物理学史

A HISTORY OF PHYSICS

世界名著译丛

[美] 弗·卡约里 著
戴念祖 译 范岱年 校





GUANGXI NORMAL UNIVERSITY PRESS
广西师范大学出版社

再版序

自从这本物理学史初版问世以来，在物理学发展的进程中出现了许多事物。对许多年轻的理科学生而言，放射性的发现和电子的引入不是在他们的那个时代发生的事情，而是象伽利略的落体实验和牛顿的引力定律一样，完全是过去的事件。由于这个缘故，给年轻的学生介绍这个历史概况是合乎需要的，而就较老的一代来说，这个概况是他们自己的智力活动和经验的一部分。

叙述本世纪物理学的主要成就是一项困难的任务。有些实验和假说，现在似乎是重要的，以后可能成为不重要的了。关于最近的〔物理学〕事态，我们缺乏眼力。对最新发展所作的历史性的叙述肯定只会有暂时的意义。但是，提出一种近似的观点或许比完全没有观点毕竟要好一些。

这本书的修订不单是增加关于本世纪所作的许多研究的新材料。对这部历史的前一部分也作了许多补充和修改。

我感谢加利福尼亚大学伦曾博士（Dr. V. F. Lenzen）提出的宝贵意见、并感谢他帮助我阅读了校样。

加里福尼亚大学

弗洛里安·卡约里

19[illegible]年12月

第 一 版 序

这本物理学史主要是供物理学的学生和教师们使用的。作者相信，读一点科学史有助于对科学发生兴趣，并且由阅读科学史而得到的关于人类知识发展的总的观念本身是鼓舞人心并有助于解放思想的。

奥斯特瓦耳德在他的《精密科学的经典作家》一书的预告中讲了如下的很有意思的话："虽然，用现在的教授方法很成功地讲授了在其现今发展状态中的科学知识，但是杰出的和有卓识远见的人不得不一而再地指出时常出现在当前我们的青年科学教育中的一个缺点，这就是缺乏历史感和缺少关于作为科学大厦基础的一些重大研究的知识。"

我们希望，本书提供的有关物理学进展的概述可能有助于弥补奥斯特瓦耳德教授如此明确地指出的这个缺点。

因为最好不要增加本书的篇幅以免超过原定的限量，所以有必要删去属于初等物理学的少数主题。

我很高兴地在这里向科罗拉多学院（Colorado College）的哲学博士S·J·巴涅特（S·J·Barnett）先生和文科学士P·E·多德纳（P·E·Doudna）先生表示谢意，感谢他们帮助我阅读校样，并且提出了许多重要的意见和批评。

弗·卡约里

科罗拉多斯普林斯·科罗拉多学院

1898年11月

目　录

巴比伦人和埃及人

1

古代苏美尔人和巴比伦人给后人留下了计量时间和角度的重要单位。七天为一星期，将昼、夜各自划分为12小时都始于巴比伦。巴比伦人在记整数和分数〔的方法上〕广泛地应用了六十进位法；他们使用同样的方法把一小时分为60分钟，把一分钟分为60秒钟。他们把圆分为360度，一度分为60弧分，一弧分分为60弧秒。今天最普通的工人都以小时来计算工作时间，好象巴比伦人在约5000年前所做的一样。今天，最著名的工程师和最杰出的天文学家以度、分和秒来计量角度，就象在幼发拉底（Euphrates）和底格里斯（Tigris）时代以前的天文学家所做的一样。这些经过精心选择的计量单位，使积累古代巴比伦人的显示惊人精确性的天文记录成为可能。一项头等重要的成就是发现了被称为岁差的黄道上二分点的缓慢运动（约每世纪1.2°）。这是巴比伦的天文学家西德奈斯发现的，他在约公元前343年指导过处在幼发拉底岸边的西普拉（Sippra）天文学校。〔1〕西德奈斯先于希腊的天文学家希帕克* 〔作出这个发现〕，直到前不久还有人认为这个发现是属于希帕克的。

原始的日晷和水钟是用于计量时间的。为了找出太阳（在正午时候）的角高，他们用了一根主要由已知长度的直竿构成的日 2

---

〔1〕 Paul Schnabel in *Zeitschrift für Assyriologie*, N,S., Vol,3,1926,p.1—60.

* 希帕克，英文为 Hipparchus,原著中把字母i误写成y——译者注

圭。直竿的日影长度和方向给出了（计量时间）的必要的数据。

梁式天平（beam-balance）被用于秤药和贵重物品[1]。写在埃及纸草爱伯斯（Ebers）上的药方表明砝码小到0.71克。

---

[1] F·Dannemann.*Die Naturwissenschaften in ihrer Entwicklung und ihrem Zusammenhange*, 2d Ed·, Vol·1, Leipzig, 1920,*p*.39; Th·Ibel, ***Die Wage im Altertum und** Mittelalter*, Erlangen,1908。

希 腊 人

在数学、逻辑学、形而上学、文学和艺术方面，希腊人曾表现出惊人的创造天才，在天文学和自然史方面，他们也显示了毋庸置疑的观察力和关于宇宙学的思辨能力，但是，他们在物理科学方面成就比较小[1]。这就证明，从观察上升到实验这一步是困难的。在柏拉图和亚里士多德以后将近两千年，实验方法才在物理科学的〔研究〕过程中取得了巩固的地位。在观察中，科学家只注意到自然界碰巧出现在他各个天然的感官前的一些现象。在实验中，科学家则在自然界中创造了新的情况，并要求对这些情况的后果作出正确的答案。一般说来，古代的希腊人还不知道这种实验方法。而且，他们早期的绝大部分物理学思辨是含糊的、微不足道的和无价值的。只是在希腊科学史的后期，即大约从阿基米德的时代开始，我们才发现有实验工作的迹象。和我们所知道的希腊人完成的大量的关于自然界的理论推断相比，希腊人进行过的实验的数目是少得惊人的。希腊人很少或从未试图以实验证据来验证他们的思辨。我们可以举亚里士多德关于世界是完美的证明来作为这种模糊的哲学探讨的明显例证[2]："构成世界的物体是固体，因此，物体是三维的。可见，三是最完美的数，也就是说，三是数字中的第一个数，因为我们不把一当成数，而

---

〔1〕 有关一般古代科学史的详细情况，可参阅George Sarton *Introduction to the History of science*, Vol.1. Baltimore, 1927.

〔2〕 *De C(o)elo*, I, 1, 由Whewell翻译.

称二为双，只有三才是我们称为全部的第一个数。况且，它具有一个起始、中间和末尾。”

4　力　学

亚里士多德论力的作用和他的落体定律

在亚里士多德的著作中讨论了力学问题。这个伟大的逍遥学派领悟到在矩形这种特殊情况下力的平行四边形的概念。他曾试作了杠杆理论，他说：距支点较大距离的力更容易移动重物，因为它画出了一个较大的圆。他把杠杆端点的重物的运动分解为切向运动和法向运动两部分。他称切向运动为合乎自然的〔运动〕；而把法向运动称为违反自然的〔运动〕。现代的读者不难看出，违反自然的运动这种说法用到自然现象上是不恰当的，而且会引起混乱。

亚里士多德的关于落体的一些观点和真理相去甚远。但是，它们仍然值得我们注意，因为在中世纪和文艺复兴时期，亚里士多德的权威性是如此之大，以致他的这些观点在科学思想上起着重要作用。他说："体积相等的两个物体，较重的下落得较快。"〔1〕他在另一处讲到，物体下落的快慢精确地与它们的重量成正比。〔2〕没有比这种说法距真理更远的了。

一个现代的作者极力为作为物理学家的亚里士多德开脱，他说："如果亚里士多德有某种现代的观测仪器，诸如望远镜或显微镜、乃至温度计或气压计，在他的手中，他会多么敏捷地利用

〔1〕 *De C(o)elo*, IV. 1, p.308.

〔2〕 这个定律是他以如下的推论所假定的："……设α没有重量，而β具有重量，并让α通过空间Ιδ，而β在同样的时间内通过空间Ιε——因此，有重量的β将通过较大的空间。如果现在以空间Ιε对Ιδ之比把重物分割，……如果整个物体穿过整个空间Ιε，那么，肯定的是，有一部分物体在相同的时间内穿过Ιδ。……" ——*De C(o)elo*, Book III., Ch.II.

这种有利的条件呀！”〔1〕可是，在落体这个例子中，实验是亚里士多德伸手可及的事。取两块不同重量的石头并让它们落下，比如说，一块石头比另一块重十倍，他不难看到，这块石头不会比另一块快十倍地降落。近来有人声称，亚里士多德被人们误解了〔2〕，实际上他心目中的意思是，当介质的减速度恰好等于引力的加速度时，物体通过有阻力的介质（空气）下落的“收尾速度”。“一个硬币在空气中下落决不会快于每秒30呎。”象这样的收尾运动的例子还有“在空中垂直下落的雨滴或冰雹”的运动、或者“从烟筒里出来的烟粒”的运动。同样大小的球通过有阻力的介质落下时的收尾速度是和它们的重量成比例的，这已由牛顿在圣保罗大教堂的实验所证实，并在他的《原理》第二部第40个命题中加以解释了。亚里士多德是否被伽利略等人误解了呢，这只能根据亚里士多德的著作来作出判定。〔3〕亚里士多德在讨论物体的运动和真空存在的可能性时曾多次应用了他的落体定律。对这些有关章节的批判性的考察表明，他认为，当物体从静止开始运动时，当物体是任何一种不同重量的金属（如金或铅）时，以及当运动的时间减少或增加时，他的落体定律都是适用的。他甚至想到把他的定律应用到真空中的运动上，如果真空可能存在的话。由此可见，亚里士多德承认他的定律在应用上的广泛性，而且包括伽利略在约2000年后进行的著名实验的那些特殊条件下的应用。我们的结论是，伽利略正确地理解了亚里士多德〔的观点〕。

---

〔1〕 参阅*Encyclop(a)edie Britannica*,第九版，“Aristotle”条。

〔2〕 *Nature* (London,1914)，Vol.92,pp.584,585,606.

〔3〕 *Aristotle's Physica*, Book IV, *Chap*.8. Aristotle's *De C(o)elo*, Book I,*Chaps*,6,8;Book III, *Chap*.2; Book IV,*Chaps*.1,2.

6 阿基米德论杠杆和流体静力学

作为一个力学的研究者，阿基米德（公元前287?—212）是远远胜过亚里士多德的[1]。他是力学这门科学的真正创始人。我们把重心（质心）和杠杆的理论归功于他。在他的《板的平衡》中，他一开始就提出了关于作用在支点两边等距的等重物是处于平衡状态的公理，然后，他致力于建立这样的原理，即“在杠杆上的不同重物仅当与悬挂它们支点相距的臂成反比时才处于平衡状态。”他对杠杆效率的评价反映在据说他的警句中：“给我一个可依靠的支点，我就能把地球挪动。”

我们从瓦里格农于1867年在巴黎出版的一本力学著作中复制了下面这张图（见图1），他用此图来例示这句名言。图中的拉丁文标语可以翻译为：“碰到它，你就能挪动地球。”

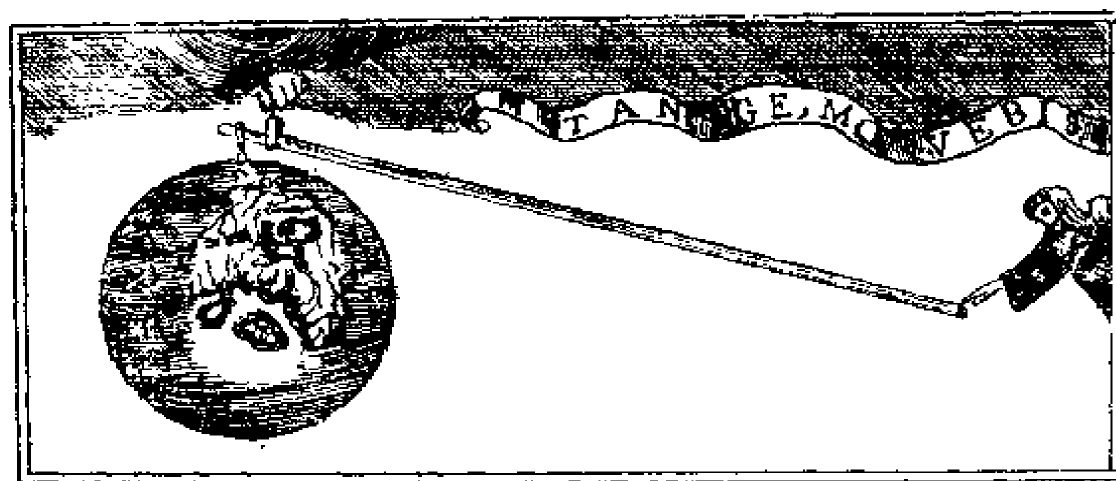


图 1

而《平衡》一书论述了固体或固体的平衡，《浮体》一书则论述了流体静力学。当希隆王请他来检验制造者自称是用纯金制

〔1〕 参阅 *The Works of Archimides*，由T·L·Heath对全书以现代的表述进行编辑校订，包括序言性的章节。剑桥大学出版社。

成的一顶王冠是否掺了银子时，他的注意力首先被比重这个问题所吸引。这个故事讲到，当这位贤哲正在洗澡时，他头脑中突然闪现出解决这个问题的正确方法。他立刻从澡盆跳出，在回家的路上边跑边喊："我找到了答案！"他分别用和王冠重量相同的一块金子与一块银子来解决这个问题。根据一个作者的说法，[1]他分别测定了金块、银块和王冠所排出来的水的体积，并据此计算了王冠中金和银的含量。另一位作者则说，[2]他分别称出浸在水中的金、银和王冠的重量，由此测定了它们在水中减少的重量。从这些数据中，他轻易地找到了答案。也有可能，阿基米德在解决这个问题时同时用了这两种方法。 7

阿基米德在他的《浮体》一书中，建立了以他的名字命名的重要的原理，即浸没在水中的物体重量的减少等于它所排开水的重量，浮体在它本身的重量中排除了水的重量。从阿基米德时候起有能耐的人们曾经作出一些关于液体压力的不正确的推论。所谓"流体静力学佯谬"（应用于这样的事实：底部受到相等压力的各个容器，未必会把相等的压力传给支持它们的物体），表明了这个问题上的含糊不清。我们特别赞赏阿基米德的研究特点，是概念的清晰和接近完美的逻辑严格性。[3]

据说，阿基米德曾在各种机械的发明方面表现出惊人的天才。据报道，他借助滑轮组移动重船一事使希隆朝廷感到吃惊。人们认为，一些武器和在船舱中排水用的无头螺旋（"阿基米德螺旋"）的发明是属于他的。 8

---

〔1〕 Vitruvius, IX. 3.

〔2〕 *Scriptores metrologici Romani* (ed. Hultsch, pp. 124～208)

〔3〕 Ch. Thurot's *Recherches Historiques sur le Principe d'Archimede*, Paris, 1869 (extrait de la *Revue Archéologique*, Annees 1868-1869). 这是一篇附有许多著作摘要的有价值的论文。

希龙和其他希腊发明家

大约在阿基米德以后一个世纪或两个世纪，两个亚历克山大人泰西比乌斯和希龙在希腊活跃起来了。他们对理论研究的进展贡献很少，但是他们显出惊人的机械发明天才。压力唧筒可能是泰西比乌斯发明的。吸水唧筒是比较古老的并在亚里士多德的时候就已经知道的。根据维特鲁维乌斯的说法，泰西比乌斯设计了古老的救火机，它是由两个交替喷水的压力唧筒联合组成的。这种机器没有气室，因此，它不能产生稳定的水流。希龙在他的《唧筒的气体力学》（Pneumatica）一书中记述了这种救火机。中世纪时期人们并不知道这种救火机。据说，这种救火机于1518年第一次在奥格斯堡(Augsburg)被使用。[1]泰西比乌斯被认为是水力风琴、水钟和弩炮的发明人。希龙在他作的称为“原始小涡轮”(eolipile)*的玩具中最早把蒸汽作为动力使用（见图2）。它是由一个带两臂的中空的球组成的，这两臂跟球的轴成直角，并且各自的一端弯成相反的方向。当蒸汽在球内产生时，蒸汽能通过它的两臂喷出并引起它的转动。它是巴克尔水磨和现代涡轮机的始祖。希龙写了一本关于大地测量学的重要的书，叫《测量高度和角度用的光学装置》

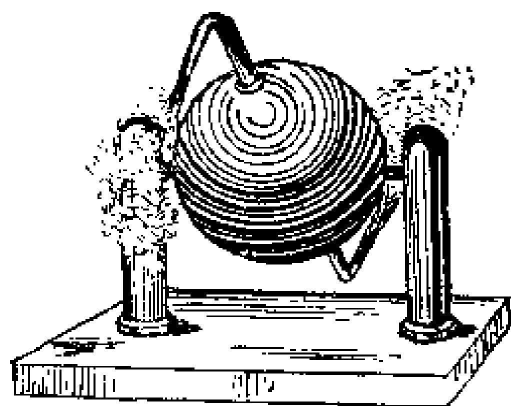


图 2

---

[1] *A. de Rochas in La Nature*, Vol. XI., *pp*.13,14;1883.

* “eolipile”中，“eoli”是拉丁语中“风神”之意，“pile”是“门”之意。这里意译为“原始小涡轮”。——译者注。

(Dioptra)[1]。

可能是在纪元后第四世纪，希腊人发明了比重计。看来好象还没有足够的证据表明它的起源是属于阿基米德的创造。西内苏斯主教在给希帕西亚的信中详细地描述了比重计。它是由一个中空的、带有刻度的、在下面加重物的锡圆筒组成的。它首先在医学上被用于测定饮水的性质，硬水在那时被认为是有害于健康的。按照德扎古利埃的说法，晚到十八世纪时它还被用于此种目的。[2]

光　学

在埃及发现的希腊文稿的残篇中讲了各种光的幻觉现象；例如，太阳在地平线上比在近天顶时显得更大[3]。的确，光学是最古老的物理学分支之一。据说在尼尼韦(Nineveh)的遗址发现了水晶作的会聚透镜[4]。在希腊，似乎在很古老的时候就已制造了火镜(阳燧)。阿里斯托芬在喜剧《云》的第二幕(公元前424年写成)中，写了一段关于"用透明度极好的石头(玻璃)点火"的对话，把这种石头放在阳光下，人们就能够"通过某一距离熔化那全部刻写"在蜡面上的"稿本"。柏拉图学派曾经讲授过关于光的直线传播以及入射角和反射角相等〔的知识〕。在公元139年于亚历山大城处于全盛时期的天文学家**托勒密**测量了入

〔1〕关于"第一个工程师"希龙的详细叙述，参阅W·A·Truesdell in *Jour·of the Ass·of Engin.Soc.* Vol·XIX·; Philadelphia, 1897, *pp*·1—19.

〔2〕E·Gerland in *Wiedemann's Annalen*, Vol·1, New Series, 1877, *pp*·150～157，也见他的 *Gesch·d·Physik*, *p*.40.

〔3〕见K·Wessely in *Wiener Studien*, Vol.13, 1891, *pp*·312～323. 摘要见*Wiedemann's Beiblätter*, Vol·17, 1893.

〔4〕E·Gerland, *Geschichte der Physik*, Leipzig, 1892, *p*·9.

射角和折射角，并把它们整理成一张表。他发现，入射角和折射角成比例，这在角度小的情况下是近似正确的。

在遥远的古代似乎已制造过金属镜。“窥镜”〔的铜锡含量的金属比〕在〔圣经〕“出埃及记”中记为38:8；在〔圣经〕“约伯”中记为37:18；在古埃及人的木乃伊墓中已发掘出这种类型的镜子。希腊人还知道球形和抛物面形的镜子。在欧几里得（约公元前300年）的著作《反射光学》（Catoptrics）中探讨了反射现象。在这本著作中我们发现了关于球面镜的焦点的最早论述。在该书的定理30中讲到，[1] 凹镜对准太阳时也能点火。在一份可能是特拉耳斯的安塞谬斯写的稿本“博比安瑟残篇”（fragment Bobiense）* 中，论证了抛物面形反射镜的聚焦性质。有几个希腊的作家看来论述过凹面镜。传说当罗马人包围叙拉古(Syracuse)时，阿基米德用了反射太阳光的镜子来保卫他祖国的城市，当敌人到达距城墙一个箭程时〔用这镜子〕使敌人的船队起火。这可能是一个虚构的故事。

希腊人精心推敲过关于视觉的一些理论。按照毕达哥拉斯、德谟克里特和其它人的说法，视觉是由所见的物体射出的微粒进入到眼睛的瞳孔所引起的。另一方面，恩培多克勒（约公元前440年）、柏拉图主义者和欧几里得主张奇怪的眼睛发射说，根据这个学说，眼睛本身发出某种东西，一旦这些东西遇到物体发出的别的东西就产生视觉[2]。

---

〔1〕 Euclidis *Opera Omnia*, Vol.7, Edidit I.L.Heiberg, Lipsiae, 1895。也见 E.Wiedemann in *Wied.Annalen*, Vol.39, 1890, *p*.123。

* “Bobiense”，即 Bovianum，是古罗马的一个地区，相当于现今意大利的 *Bojano* 城。

〔2〕 关于柏拉图的学说，见 *The Dialogues of Plato*, Vol.II., 由 B.Jowett翻译，C.Scribner's Sons, New York, *pp*.537 et seq.

电 和 磁

关于电和磁的几个孤立的观察我们归功于希腊人。古希腊的"七贤"之一，米利都的泰勒斯（公元前640—546）被认为有这种知识，他知道，摩擦了的琥珀会吸引轻小物体，现在称之为磁铁矿或天然磁石的某种矿物具有吸铁的力量。琥珀，一种矿物化的带黄色树胶，在古代是用于装饰。琥珀和光亮的金银合金以及金子一样，被称为"琥珀金"（electron）；由此产生了"电"（electricity）一词。大约是在泰勒斯以后三个世纪，提奥弗拉斯特在他的《论宝石》（On Gems）的论著中，叙述了另一种摩擦生电的矿物。现在我们知道，所有的物体都能这样起电。普林尼曾说过，无知的人把天然磁石称为"活铁"（quick-iron）。关于牧人玛格内斯（Magnes）的寓言表明这种磁吸引现象曾大大地激励起人们的想象，玛格内斯在克里特岛的艾达山上（Mount Ida），他的皮鞋底的钉子和手杖的铁尖是如此牢固地被大地所吸引，以致他很难使自己离开。他努力探究其原因，发现了一种奇妙的石头（磁铁矿）。另一个寓言讲到，一座有很大吸力的磁山吸出了甚至是距它相当远的船上的铁钉[1]。

普林尼讲了另一个关于天然磁石的故事。在亚历克山大城亚西诺（Arsinoe）寺庙里用磁铁矿建成的拱形屋顶结构是为了要把皇后的铁铸像悬吊在空中。随着时间的流逝，这个故事经过了许多润色。这样，按照可敬的比德的说法，在罗德岛上的贝利罗丰（Bellerophon）的骑马有5,000磅重，这只马被磁铁吊起来了。[2]

[1] 这个故事还经常在文学作品中出现，例如，Arabian Nights的第三个僧人的故事中就讲到了类似的事。

[2] Bede, *De Sept. Mirac. Mundi*；本杰明（Park Benjamin）把这个故事引用在 *The Intellectual Rise in Electricity*, New York, 1895, p.46.（此后这个故事被认为是本杰明的。）

关于穆罕默德的灵柩也有一个类似的故事。当然，这样悬吊在空中，用机械的方法是不可能的。

在古代，铁主要是在爱琴海沿岸和地中海的岛屿上开采。上述磁铁矿物据说也是在小亚细亚靠近玛格尼西亚（ Magnesia ）的地方被发现的。按照卢克莱修的说法，“magnet”（磁铁）一词是来源于“Magnesia”。在萨摩色雷斯（ Samothrace ）岛上有铁矿。该产地的矿工们看见了和所谓的萨摩色雷斯环有关的天然磁石的作用。苏格拉底说：“……这石不仅吸引铁环，而且还使铁环具有类似的吸引其它铁环的能力；有时你可以看到一些铁片和铁环彼此勾挂以致形成一个十分长的链；而它们的悬吊力全都来自原磁石。”[1]

古希腊人还不知道磁铁的极性和可以存在于电荷之间或磁极之间的排斥现象。

气　象　学

我们知道，在十五世纪中叶以前无论在什么地方都没有保存系统的气象记录[2]。还是希腊人多少注意到了气象学。正是在雅典，我们发现了最古老的观察风向用的装置。大约在公元前100年建造的“风向塔”，其主要的部件直到今天依然如故。献身于科学的这个小小的八角形的大理石建筑物，具有令人感兴趣的神话式的装饰。在塔上部的外面有一条描绘希腊风神（AEolus）的儿子的薄浮雕饰带；他把风幽禁在洞穴里，并按照他看来是适当的程度释放出来，或者象上级神命令他的那样把风释放出来。在这里的科学仪器包括有放在塔对面用于计量白天时间的日晷，放在塔内部的水钟和以海神形式架在塔顶最高处的风信鸡。风信鸡在希腊或罗马未必会很普遍，因为在希腊文或拉丁文中没有称呼

[1] Jowett, *Dialogues of Plato*, Vol. I., p.223.(Ion.)

[2] G. Hellmann, Himmel und Erde, Vol. II, 1890, p.113.

这种仪器的名字。[1] 在希腊人那里气象学几乎谈不上具有科学的地位。亚里士多德的门徒、埃雷苏斯的提奥弗拉斯特（公元前371—286）写了一本《论风和天气的预兆》的书[2]，不过象绝大多数其它的希腊哲学家一样，他不能说是一个以耐心和精细的观测来代替教条的断言和权威的说教的人。亚里士多德做了一个良好的关于露的形成的观察；即露仅在晴朗的和寂静的夜间才形成。[3]

生活在约公元前275年的索里的阿拉图斯写了一本《占卜学》（Prognostics），他从天文现象的观察中作出天气预报以及天气对动物发生影响的种种解释。阿拉图斯的这本书和其它著作都曾经出过几种版本；有一个版本是由米兰克松（Melanchthon）出版的。

声　学

埃及的金字塔和古代城市的遗迹为在我们具有抽象的几何学和理论力学的最早记载之前许多世纪就有实用几何学和实用力学这一事实作了佐证。同样，据说上古民族所具有的声乐和器乐知识，证明音乐艺术比声学理论要古老得多。和声学的起源可以追溯到毕达哥拉斯（公元前580?—500?），但关于他的研究的记事是如此地跟寓言和错误交织在一起，以致于难于恰当地确定什么是毕达哥拉斯所做的研究。据说，当他经过铁匠铺时，他注意到打

〔1〕 Hellmann，同上，p.119.

〔2〕 J.G.Wood 翻译，London，1894 年版，此译文增添了一篇导言和一篇论其历史意义和价值的附录.

〔3〕 J.C.Poggendorff, *Geschichte der Physik*, Leipzig, 1879, p.42.（以后凡是引 Poggendorff 的都是引自他的这本著作。）

在铁砧上的铁锤发出的“第四”、“第五”和“第八”音程的声音。他发现铁锤的重量[1]各为：1:3/4:2/3:1/2。其后，用同质、等长、等粗的弦线进行实验，证明，当重量比为1，3/4，2/3，1/2时会给出上述音程。这项研究指出了音程间的算术关系，并且在相距甚远的音乐和算术之间建立了密切的联系。

显而易见，上面的说法有二个错误。上述的那些重锤不会产生那些音，正确地说，弦线也没有重量规律；音调不是随重量而是随重量* 的平方根而改变。

一些现代的作者作出推测，毕达哥拉斯的见解没有实验的根据，使他得到他的知识的那个铁匠舖是在埃及的土地上，他从哪里吸取了他的知识[2]。另一些作者假定，毕达哥拉斯确实没有改变弦线的张力，而是改变了它们的长度，因此，得到了音调与弦长成反比的正确定律。[3] 据说，毕达哥拉斯是第一个在自然音阶中建立起八个完全的度的[4]。

毕达哥拉斯关于和声和音阶的思辨是不受对实验深入探索的约束的。七个行星是七弦竖琴的七根弦，它给我们一种美丽的

---

〔1〕 Nicomachus, *Harmonices*, I., *p*.10,（Meibomius 编辑）；Porphyry, *Ptol.Harm.*, c.3, *p*.213; Diogenes Laertius, VIII.,12.

* 正确地说，音调随弦线质量的平方根而改变——译者注。

〔2〕 参阅*Encycl. Brit.*, 9th ed.中的“Music”一条，这个条目包括了许多关于希腊音阶的知识。

〔3〕 Helmholtz,*Sensations of Tone*.由 A·J·Ellis 翻译,London, 1855.p.1. 关于毕达哥拉斯的更多的参考书目和细节，见E·Zeller, *History of Greek Philosophy*, 由S·F·Alleyne 翻译,London,1881,vol.1, pp.431—433. 也见C·H·H·Parry,*The Evolution of the Art of Music*,New york, 1896, “Scales”, pp.15—47.

〔4〕 Helmholtz,同上, *p*.266.

"天体和谐"[1]。这种思想不是作为诗歌而是作为物理哲学提出来的。人们的耳朵不能听见这种行星间的音乐的事实，似乎并未减少他对它存在的信念！

亚里士多德接触到声学理论，他持有关于空气的运动性质构成声音的正确思想，并且他还知道，如果管的长度加倍，则管内的振动就要花两倍的时间。

原 子 论

值得注意的是，原子论在希腊找到了它的最早的提倡者。曾经最有力地统治着哲学思想的两个思想家亚里士多德和康德都教导说，空间是连续地充满着的[2]，从这个事实出发，立刻可以理解物质结构的原子理论远不是一个不证自明的真理。原子论起源于留基伯。伟大的辩证论者爱里亚的芝诺提出了反对运动的可能性的微妙的论证[3]，奇怪的是，原子论是作为这些论证的逻辑的结果而建立起来的。芝诺的论证之一是阿基里斯(Achilles)*不能赶上龟。因为，阿基里斯必须首先到达龟开始行走的地方。而在那一段时间里，乌龟将继续移动一小段路程。阿基里斯然后必须到达那里，而龟仍然会向前进。只是在近代，数学的哲学才完满地澄清了这类问题。显然，在留基伯看来，摒弃在芝诺的论证中包含着的距离的无限可分性，就避开了由芝诺作出的不可能的结论。对可分性建立起这样的极限就导致了原子的概念，即物理学上的"不可分"的概念。原子论的伟大的古代解说者是阿布

---

[1] Nicomacius, 前引书, I., p.6; II., p.33; Pliny, H.N., II., p.20; Simpl. in Arist. *de C(o)elo. Schol.*, p.496, 11.

[2] Kurd Lasswitz, *Geschichte der Atomistik*, Vol. 1, p.2.

[3] John Burnet, *Early Greek Philosophy*, London, 1908, p.387.

* 阿基里斯，希腊神话中的英雄，他健步如飞。——译者注。

迪拉的**德谟克里特**（约公元前460—370）。他教导说，世界是由空虚的空间和无数不能再分的、看不见的微小原子组成的。仅仅以原子的结合和分离就能〔解释〕物体的产生和消灭。甚至于感觉和思想现象也是由于原子结合的结果。原子论被希腊哲学家伊壁鸠鲁（公元前341—270）所采纳，他的其它方面的学说对科学起了反作用。在道尔顿发现化学上的倍比定律之前，原子论从没有在科学进展中起到什么重大的作用。

希腊物理学研究的“失败”

虽然希腊人物理学研究这一智力活动领域的成就比起其它方向中的成就要少，但是他们在这方面比古代其它民族都取得更多的成就。为什么希腊人在物理学方面进展很少，这个问题是个古老的谜，并且不是容易回答的。弗兰西斯·培根说：“〔他们寻求和发现真理的〕过程是从感性和特殊立刻飞跃到最一般的命题，把这些命题看作是某些作论证用的固定不变的极点，并且从这些极点出发，通过中间项推导出其余部分：毫无疑问，这是简要的方法；但是，也是轻率的方法；这种方法决不能引导人们了解自然，虽然它为了辩论提供了一种容易的和现成的方法。”“古人在开动脑筋和抽象的思考方面处处都证明他们自己是了不起的人。”[1] 这个以及由惠威尔[2] 米耳[3] 、和罗宾逊[4]

〔1〕 F·Bacon,in Preface to the *Novum Organum* (works, New York,1878,Vol. I ,pp.42,32.)

〔2〕 W·Whewell, *History of the Inductive Sciences*, New York,1858 Vol.I,p.87.

〔3〕 J·S·Mill,*System of Logic*,London,1851,Vol. I , p.367. Mill 在这里采用了 *Prospective Review*(February,1850) 这本书中的一个作者的观点。

〔4〕 James Harvey Robinson,*The Mind in the Making*,1921. Chaps.Ⅳ, Ⅴ.

提出的其它的解释，都立足于认为古希腊思想家们所达到的希腊人的智力努力在亚里士多德以后就没有什么人了。可是，正是在亚里士多德之后的五百或六百年的时间内，希腊的数学、天文学和地理学达到了它们的全面繁荣的时期。按照一些作者的说法，“希腊思想的灿烂时期，一般地而且是正确地假定为大约在亚里士多德去世的时候就达到了终点”，亚里士多德是在纪元前322年去世的，可是，这样的假定忽视了真正的事实。欧几里得、阿波罗尼乌斯、阿基米德、第奥方塔斯、埃拉托色尼、希帕克、托勒密，都是在亚里士多德以后活跃起来的。在这时期，经验的和实验的方法取得了相当的立足点。“古代的哥白尼”阿里斯塔克就属于这个时期。观测天文学家希帕克和托勒密把星盘和象限仪用于天文观察。阿基米德在解决“王冠问题”时用了实验方法，他的关于浸没在水中的物体的重量的减少等于它所排开的水的重量的原理是来源于经验的。他使罗马的船队着火的故事表明了以镜子反射太阳光线的实验。埃拉托色尼测量过地球的大小，其准确性直到1617年斯涅耳在荷兰的测定以前是没人胜过他的。埃拉托色尼用日圭测量了亚历克山大城正午时的太阳角高度。亚历克山大城及其南部的城市赛恩（Syene）的高度差就得出了纬度差，以这个纬度差和从赛恩到亚历克山大城的距离就得出了计算地球圆周的资料。亚历克山大城的大工程师希龙改进了测量仪器。另一个希腊人发明了比重计。托勒密关于折射的实验研究和他的关于大气折射的精心研究，是“古代最卓越的实验研究。”〔1〕

对这些事实的考虑表明，希腊人已开始发展实验科学，但是这种进展很快就受到外力干预的阻碍。强大的罗马帝国吞并古希腊人的社会原因，以及基督教和古代宗教之间的大博斗，使在希腊人中的创造性的科学研究到了末日。

---

〔1〕 George Sarton, *Introduction to the History of Science*, *p*.274.

18

罗　马　人

罗马人的天才都用在战争、征服、统治和法律上，而对于纯数学和科学的进展没有作什么努力。罗马的科学著作家满足于收集希腊前辈的研究。在这些人当中有奥古斯都皇帝的建筑师M·V·波利奥（公元前85--26）；《物性论》（De Rerum Natura）的作者**卢克莱修**（公元前95—52（?））；尼罗皇帝的家庭教师辛尼加（公元2—66）；自然史大著的编者普林尼（公元23—79）；以及A·M·S·**博埃修斯**（480?—524），他曾经一度是塞奥多里克国王（King Theodoric）的宠臣。

卢克莱修的《物性论》[1]是一本享有盛名的诗集，这不仅是因为它的词藻华丽，而且还因为它的敏锐的科学观察和对现代科学思想作出了光辉的预言。卢克莱修是古代第一个论及磁铁的排斥作用和用铁屑进行实验的作者。当把天然磁石放在黄铜盆下时，铁屑“在黄铜盆内狂欢”。卢克莱修把热看成是一种物质，就象在他之前的希腊人赫拉克利特和德谟克里特一样。卢克莱修在“几种热的微细物体”的说法中讲道[2]：“热把空气一起带来，没有热也就没有空气，空气跟热混合在一起。”这篇长诗给希腊人的原子论作了最完全最明白的古代解说。原子是不可分割的、不全相同的小固体；但是，所有的原子都处在永恒的运动中；它们的数量是无限的。现代的数学家在这里发现了无限量的

〔1〕 Lucretius, *De rerum natura*, Bk. I, lines 55,600; Bk. II, lines 96—98; 478—568.

〔2〕 同上, Bk. II, lines 150—156; Bk. III, line 235.

概念，它和作为不是变量而是恒量的那些术语的现代定义是一致的。这个无限量是指可数的多样性，他使用了它们的整体的性质。[1] 卢克莱修设想一种固体的许多原子互相钩挂着以致于粘连在一起。带钩的原子在更近的时候被约翰·伯努利采用过，也被十九世纪的化学家用于解释化合作用和原子价。牛顿在卢克莱修的长诗中发现了关于伽利略落体原理的清楚的叙述。在没有阻力的真空中，所有的原子，无论它是轻的或重的，都以同样的速度降落。卢克莱修赋予世界的现象以必然性，或者象我们将要讲到的那样，赋予世界以物理的规律性。卢克莱修十分明确地宣称过物质守恒，几乎也相当明确地声称过能量守恒。近来生物学家在这奇异的诗篇中发现了著名的孟德尔遗传定律的表述。正如D·W·汤普森讲过的一样，每一代科学家都可能从他自己的知识的角度研究卢克莱修的诗篇，并从中发现某些预言式的先见。

傅埃修斯写了一本《音乐》著作，其中包括了许多论希腊人的和声理论的知识。辛尼加讲授过虹霓的色彩跟一片玻璃的边缘所形成的色彩一样。他观察过一个球形的装满水的玻璃容器能把物象放大，但是他只是从这个观察导出了再没有比我们的视觉更靠不住的说法。他的著作充满了道德、情操。或许是由于这方面的原因，他的《自然界知识丛书》第七卷（Naturalium quaestionum libri Ⅶ）在中世纪时期被当作一本物理教科书使用了很长时间。[2] 他对力学的理解是用故事来说明的，他严肃地讲到，一条紧靠着大船的不到一呎长的鱼，甚至在大风下也能完全停止它的摆动。他声称，在阿克图（Actium）的战斗中，安东尼乌斯

〔1〕 C.J.Keyser, *Bull.Am.Math.Soc.*, Vol.24, 1918, pp.268, 321.

〔2〕 F.Rosenberger, *Geschichte der Physik*, Part Ⅰ., 1882, p.45.（本书以后引用 Rosenberger 的著作就是指他的这本书）

（Antonius）的最大的船舰是这样牢固地联结起来的。

不知道其出生年月和地点的克里奥梅德斯大概是在奥古斯都皇帝时候出名的人物。象阿基米德和欧几里得所做的一样，他讲到：空容器底上的戒指正好被它的边挡住视线，可是当容器注满水时就变得可见了。然而，他进一步推论并设想当太阳实际上稍稍低于地平线时，也可以看到太阳。他是在托勒密以后第一个考虑到大气折射的人。

阿 拉 伯 人

阿拉伯民族的成长在思想史中显得格外壮丽。散居的野蛮部落在一阵宗教狂热的熔炉中突然融合为强大的民族。经历了战争和征服之后，随着出现了理智活动的时期。大约在公元八世纪穆罕默德开始以世界文化的领袖的形象出现。他们神速地得到了印度人和希腊人的科学和哲学宝库。人们把希腊文的古典书籍翻译成阿拉伯文。化学、天文学、数学和地理学成为人们爱好的研究课题。只在少数几个事例方面阿拉伯人对科学作出了独创性的贡献；但是，一般讲，他们在创造性研究方面并不突出；与其说他们是创造不如说他们是学习。

只有一个物理学分支是在阿拉伯的土壤上得到了有效的培育，而且只有一个人能突出地跟这个分支相提并论。这个分支就是光学，这个人就是**阿勒·哈增**（965?—1038）。他的阿拉伯名的全称是，阿布·阿里·阿勒·哈桑·依卜恩·阿勒·哈桑·依卜恩·阿勒·海塔姆（Abû 'Alî al Hasan ibn al Hasan ibn Al Haitam）。他出生在底格里斯河畔的博斯拉（Bosra），并被提升到大臣的职位。当一个哈里发*听到了阿勒·哈增想出了治理尼罗河水、使每年都有丰富的河水用于灌溉的计划时，他就被这个哈里发派到埃及去了。仔细视察河床之后，迫使他放弃了这个计划。他犯了其它错误，使他自己在哈里发面前失宠。到这个哈里发去世之前，他一直佯装精神错乱并寻找避难处。其后他以复制稿本维持生活。他著有天文学、数学和光学。

他的《光学》被译成拉丁文，并在1572年于拜尔（Bâle）出

* 哈里发(Caliph)，伊斯兰教国家政教合一的领袖。——译者注。

版。他从希腊人那里学到了在反射时〔反射角和入射角〕相等的定
22 律。他加上了这两个角都在同一平面上的法则。他对球面镜和抛物柱面镜作了研究。通过某一点的光线更多，则该点的热更强。平行于主轴的光线入射到球面镜时，则反射到这个轴上。从球面镜上各点反射的全部光线都在这样一个圆周内，这个圆面垂直于轴（并且这些光线仅仅）通过轴上一个相同的点。他造了一面由几个不同的球环组成的镜子，每一个球环都有它自己的半径和中心，然而要如此选择所有的球环使所反射的各种光线准确地集中到同一个点上。下面是闻名的“阿勒·哈增问题”：给定发光点和眼睛的位置，寻求球面镜、圆柱面镜或圆锥面镜上的发生反射的某一点。这个问题的发端是在托勒密的光学中发现的；在阿勒·哈增对它进行精通而又复杂的讨论之后，它在欧洲就闻名了，因为它提出存在着几何学困难的一般问题。[1]

在重复托勒密做过的工作当中，阿勒·哈增测量了入射角和折射角，并证明了托勒密指定入射角和折射角之比是常数的说法是错误的。但是，他们二个人都没有发现真正的折射定律。他的仪器是由一个被垂直地支架着的带有刻度的圆形铜盘组成的，并把它的一半浸入水中。入射光线通过盘边的孔洞并通过在中心穿孔的圆盘面。这个仪器十分类似于现在初等教学中使用的仪器，具有允许准确地读出入射角和反射角的便利之处。

23 当太阳和月亮靠近地平线时，其直径显著加大，他断言这是一种幻觉，由于它们的大小是以地面物体的较小的距离来作估计

---

〔1〕关于阿勒·哈增和他的研究见 Paul Bode, “Alhazensche Spiegel-Aufgabe”, Separat-Abdruck aus dem *Jahresbericht des Physikalischen Vereins zu Frankfurt a.M.*, 1891–92; Leopold Schnaase, *Die Optik Alhazens*, Pr. Stargard, 1889; Baarman in *Zeitschr.d.deutschen Morgenl.Gesellschaft*, 36, 1882, p.195; E.Wiedemann, in *Wiedemann's Annalen*, N.F., Vol.39, *pp*.110—133; 也见Vol. 7, p.680.

而造成的。这种解释在今天仍然流行，但是没有被普遍接受。阿勒·哈增得到的结论是行星和恒星没有接受来自太阳的光，而是它们自己在发光。[1]

阿勒·哈增是详细叙述和描绘人眼的第一个物理学家。他讲到，他是根据解剖学著作作出他的解释的。关于某些眼睛部位的名称是起源于译成拉丁文的阿勒·哈增的描述，例如，“网膜”、“角膜”、“玻璃状液”（玻璃体）、“前房液”等术语。[2]

他的一些阿拉伯前辈和同时代人以及他自己，是坚决反对欧几里得和柏拉图学派关于视觉是由眼睛放出光线的理论；他们赞成德谟克里特和亚里士多德的观点，即视觉的原因来自被看见的物体。[3]

阿拉伯人发展了“比重”的概念，并作出了测定它的实验方法。阿勒·比鲁尼为此使用了一个带有向下倾斜的喷咀的容器。把水灌进容器直到喷嘴口，然后把物体浸入容器中，同时量度溢出的水重。和物体在空中的重量比较，这就得到了比重。阿勒·哈齐尼在1137年写成了《智慧秤的故事》[4]，在这本书里，描述了一根带有五个秤盘的奇妙的杆秤，用于测定在空中和水中的物体的重量。一个秤盘可以沿着有刻度的秤杆移动。他指出了空气也一定具有浮力，因而它使物体的重量减少。[5]

---

[1] 他的关于这个问题的论文由E·Wiedemann译成德文发表在*Wochenschr.f.Astr.,Meteor.,u.Geogr.*,1890,No.17.

[2] Charles Singer, *Studies in the History and Method of Science*.Oxford,1917—1921,Vol.Ⅱ.,p.389.

[3] E·Wiedemann in *Wiedemann's Annalen*,Vol,39.1890,p.470.

[4] 全文摘要载于*Journal of American Oriental Society*, Vl., pp.1—128; 也见F.Rosenberger, Part 1.,pp. 81—86.

[5] 读者若对阿拉伯人的水钟感兴趣，则可参阅A·Wittstein, "Ueber die Wasseruhr und das Astrolabium des Arzachel," 在*Schlomilch's Zeitschr.*, Vol.39,1894, Hist. Lit.Abtheilung, p.43.

24 中世纪时期的欧洲

公元第三世纪起欧洲野蛮民族开始迁移。强大的哥特人从北面打进了西南方向，横过意大利和粉碎了罗马帝国。接着出现的“黑暗时代”是欧洲各种制度和民族产生的时候。基督教传进来了，拉丁语成为教会和学术界的交往语言。

思想的暧昧和奴颜卑膝、观念的模糊和神秘主义，是中世纪的特征。科学上的著作家主要是注释家，并且从没有考虑过以实验来验证古代作家的陈述。中世纪的科学最初主要是从拉丁文的史料取得的。我们已经指出了罗马科学的微不足道。但是，罗马的作家经常引证希腊的著作，这就自然地产生了直接读希腊原著的愿望。这种愿望在十二世纪因获得希腊论著的阿拉伯文译本而部分地得到满足。亚里士多德的著作变得众所周知，并开始被认为是至高无上的权威。谁敢于否认亚里士多德的论述，谁就会大祸临头！在巴黎，拉米斯（Petrus Ramus、1515—1572）被禁止作反对大哲学家的讲演或写作，否则就要处以肉刑，这就是个见证。在物理学上，亚里士多德的权威直到伽利略时候仍是不可动摇的。在中世纪，用亚里士多德的著作来阻碍科学的进一步发展，这并不是亚里士多德的过错。他是古代的最深刻的思想家；他的著作对于所有研究者都是一种刺激和挑战——实际上对伽利略也是如此。[1]

---

〔1〕 比本书更详细地讲到中世纪物理学的，见 George Sarton's *Introduction to the History of Science*，以及见 Lynn Thorndike's *History of Magic and Experimental Science*.

火药和航海罗盘

这时期的欧洲人开始拥有极大地影响到文明进展的两种发明，即火药和罗盘。它们的起源尚未弄清*。第八世纪(？)时，格拉克斯，和1250年左右阿尔伯特·马格努斯已经知道火药是由硫磺、硝石和木炭配制成的。据说，欧洲在十二世纪时将火药用于爆破。在十四世纪末之前尚未有制造火器的。[1]

在中国传说中有模糊的关于指南车的段落，有些人认为，这证明在遥远的古代已使用陆地罗盘。[2]关于陆地罗盘的不明确的证据出自于十一世纪之前。在死于公元1093年的中国数学家和仪器制造家沈括的著作中发现了“在任何有关磁针的文献中最早的明确的叙述。”[3]那时候的这个中国著者说：“方家以磁石摩针锋，则能指南；然常微偏东，不全南也。”[4]这句引文揭示了关于磁偏斜的知识。

在航海中引用磁针的最早记载是在1100年稍后一点时候，一个中国的作者认为是在1086—1099年之间，当时应用磁针的不是中国人，而是在广州和苏门答腊之间航海的外国海员（可能是穆斯林）[5]。

在欧洲，第一个讲到航海罗盘的是十二世纪英格兰的圣阿尔本斯地方的A·尼坎姆。另一种说法是出自约同一世纪末发表的

---

* 鉴于本书写作时间较早，作者对于中国是火药和罗盘的故乡尚未有认识。所以本书有关的说法欠妥。有关中国古代对物理学发展的贡献，请读者参阅译后记。——译者注

〔1〕 Rosenberger,同19页注〔2〕,Part，I.,p.97.

〔2〕 Benjamin， 同11页注〔2〕，pp.63—74.

〔3〕 George Sarton,pp. 756，764.

〔4〕 引自 Benjamin,p.73.原文见《梦溪笔谈》卷24——译者注.

〔5〕 George Sarton,p.764.

26 法国人普罗万斯的诗集中，他讲到一种能使铁转动的深褐色石头，航海者藉此使自己有不致迷航的技巧。巴勒斯坦的一个主教在1218年说，磁针“对于航海是最必需的东西。”

老的航海罗盘是以非常原始的方式操作的。在一个阿拉伯作者的1282年的著作中叙述到，把磁针放在茅草或木片上，它们就漂浮在水盆中。当它们静止时，磁体就指北或指南。类似的实践似乎在古代的意大利人中也流行过。*

关于磁的知识和制造罗盘的重大进步在法国大师彼得·德·马里古——通常称为佩雷格伦纳斯**——于1269年8月12日写的一封信中揭示的。这个人有充分理由受到罗吉·培根的极大敬仰。他的信揭示了磁的两极性的知识，他说，由一块磁铁分成的许多碎块都具有两个极，他得到了不同的极彼此吸引的定律，并且说到，强磁体会倒转弱磁体的极性。佩雷格伦纳斯发明了一种带有刻度的和装上枢轴的磁针的罗盘。根据磁的吸引，他设计了永恒运动的机械，而且非常精巧，把成败的重担加在工人身上。他自己在那时是一个军人，可能没有工具制造这样复杂的机械。他的信是在卢切拉(Lucera)前线的战壕中写成的。[1]〔卢切拉是意大利南部的一个城镇，那时被安朱(Anjou)的查理(Charles)包围了〕

在佩雷格伦纳斯以后，刻度圆盘被通常由32个星点组成的

---

* 这种方法最早起源于中国，后来通过阿拉伯传到欧洲。——译者注。

** 佩雷格伦纳斯(十三世纪中叶)，曾是路易九世军队中的工程师，中世纪少数从事实验工作的学者之一。——译者注。

〔1〕 佩雷格伦纳斯的信是在1558年出版的。它再版于 *Hellmann's Neudrucke von Schriften u. Karten über Meteor. u. Erdmagn.*, No. 10, Berlin, 1898. 也见 Benjamin, *pp.* 165—187. 尤其是 P. F. Mottelay, *Biographical History of Electricity and Magnetism*, London, 1922, *pp.* 45—54.

"方位罗盘"(Rose of the Winds)代替了。[1]最近几年又有恢复佩雷格伦纳斯的刻度圆盘的趋势。

在那不勒斯(Naples)交易所里竖起一尊铜像，它作为对1302年罗盘的发明者焦伊亚的纪念。这个人是南意大利的阿马尔菲(Amalfi)的侨民，人们长期来把他看作是罗盘的始祖。我们现在知道，在他以前欧洲已使用过罗盘，但是，他可能是通过对罗盘的构造方面作了改进而把自己当作是罗盘的发明人的。

一个重要的革新是以平衡环悬挂磁针，这就是闻名的"卡丹吊环"。但是，卡丹(1501—1576)并未要求这项发明权，它最初也不是为用于罗盘而设计的。他描述了一种为皇帝设计的椅子，使皇族的显达贵人在驱车时坐上这种椅子就感觉不到最小的颠簸。卡丹谈过，同样的装置先前曾用在油灯上。[2]

流 体 静 力 学

在第十世纪的手稿中说明了阿基米德原理在有名的王冠问题上的应用，王冠的制造者说王冠是纯金的；可是实际上掺进了银子。[3]可能是在第十三世纪写成的一篇论文中，解释了如何以阿基米德的方法确定无规则物体的体积，并强调了这种方法的实用意义，即指出某些品种的商品的价值取决于其大小。蒂罗说，在这份稿本中第一次出现了"比重"一词。

---

〔1〕 关于它们的不同形式，参阅 A·Breusing, *Die Nautischen Instrumente bis zur Erfindung des Spiegelsextanten*, Bremen,1890,pp.5—24.

〔2〕 Breusing,同上,p.16;Cardan,*De subtilitate*,*Lib*.XVII.,de artibus artificiosisque rebus,Basil,1560,p.1028. 威廉·汤姆孙爵士在1876年获得了一种著名的罗盘的专利，见 *Encyclopaedia Britannica*,9 *th ed*., "Compass" 一词.

〔3〕 Ch·Thurot, *Principe d'Archmède*,p.27.

阿基米德原理和王冠问题成为数学家们的爱好的题目，可是很少得到哲学家们的注意。晚到1614年，亚里士多德的杰出的研究者凯克尔曼传播了如下的谬论："重力是运动的特性，它起因于寒冷，密度和大小，由于这种特性，元素往下降落。""水是较下层的冷和湿的中间元素。"[1]哲学家们讲授说，水在水中或水面上没有重量，因为它是在它自己所在的地方，在水上的空气没有重量，而水在水泵里上升是因为自然界厌恶真空。[2]人们如此坚定地相信这些关于压力的虚假的原理，以致当波意耳发表他的跟亚里士多德的观点相矛盾的流体力学的实验结果时，他感到不得不在"流体静力学的佯谬"这标题下提出他自己的观点。[3]

光　学

在十三世纪时欧洲人消化了从阿伯人那里得到的光学知识。在1278年科林思(Corinth)的大主教威廉·冯·莫尔贝克将阿勒·哈增关于抛物柱面镜的论文翻译成拉丁文。约1270年，他的朋友图林根(Thuringian)的修道士威特洛，或称维特里奥，以阿勒·哈增的著作为基础整理了一本比阿勒·哈增的著作更精练又较系统的光学著作。威特洛把星星的闪烁解释为由于空气的运动，并且他证明了，若通过运动着的水观察星星，则星星的闪烁更为强烈。他指出，虹霓不是象亚里士多德所说的那样只是由于反射而形成，而是由于反射和折射二者而形成的。

吸取了阿拉伯思想源泉的中世纪作家中杰出的人物是罗吉·培根(1214？—1294)。他著有光学，并且人们误认为折射望远镜是他发明的。毫无疑问，培根曾想到设计这样一种仪器的可能

〔1〕 Whewell，同16页注〔2〕 Vol. I.，1858，p.236.

〔2〕 同上，p.236，

〔3〕 同上，pp.189，236

性。通过这种仪器能使眼睛"辨认出在相当远距离的最小的文字。"但是，培根从没有制造、也没有试图制造这样一种仪器。为他争这个发明权是由于对他的著作中的一节引文的误译而造成的。[1]

培根是中世纪最有才能思想的人之一。在牛津和巴黎受教育以后，他以牛津的教授的身份而闻名。他对于经院哲学和教士们的不道德行为的公开的蔑视导致他被控告为信奉异教，并被捕下狱。他从他的牛津的单人牢房里发出了一封关于"实验科学"的呼吁书，这几乎打动了他的老朋友克莱门特教皇四世(Pope Clement IV)。可是，培根的思想超越了他那个时代，因而没有立即得到果实。在巴黎他第二次被监禁了十年。这样，这个重要人物的天才被他那个时代的政治和思想的专制主义所摧残。 29

[1] E. Wiedemann in *Wiedemann's Annalen*. Vol.39, 1890, p.130.

30

文 艺 复 兴

十六世纪是激烈的智力活动时期。人们的思想从古代的停泊处解开缆绳，在广阔的探索求知的海洋上启航前进了。

这个运动是波澜壮阔的。在这里，我们目击古典学术的复兴，在别处，我们目击了安吉罗、拉斐尔和达·芬奇的艺术杰作。在那儿，我们看到了以宗教改革闻名的反对教会权威的伟大斗争。与世隔绝的数学家将新的生命灌注到代数学和三角学之中。天文学家凝视星辰，创建了一个新的宇宙体系。物理学家摒弃了经院哲学的思辨，开始以实验的语言来研究自然。

哥 白 尼 体 系

文艺复兴时期科学上第一个伟大的胜利是推翻了托勒密体系和建立了哥白尼体系。我们暂且把物理学搁置一旁，简短地谈一下它的姐妹科学天文学发展中的这个伟大时代，同时还要插入少数关于希腊天文学的评述。

毕达哥拉斯学派认为大地和天体都是球形的，在他们的"球体和谐"的学说中体现了这种思想。大地是球形的观点在毕达哥拉斯以后的希腊人中流行。亚里士多德根据月偏食时大地在月亮上的圆形阴影证明了这个观点。大地的球形被最伟大的观测天文学家希帕克和托勒密完全接受。但是在中世纪初期（公元600年以前）希伯来人关于大地是平面的观念被基督教徒普遍地接受了。可是，中世纪稍后的时期的几个著者，例如可尊敬的比德、

31 阿伯拉尔特、格罗西特斯特和吕尔都主张地球是圆的[1]。

哥白尼体系的希腊预言

希腊的天文学家不仅讲过地球是圆形的，而且他们中的一些人，特别是旁托斯的赫拉克利德和萨摩斯的**阿里斯塔克**持有关于太阳系的现代观念。阿里斯塔克实际上在某种程度预见到哥白尼的假说，因而被人们称为“古代的哥白尼”。[2]他提出了以太阳为中心的假说。阿基米德曾这样描述它：“他的假说是，恒星和太阳是静止不动的，地球沿圆周线围绕太阳运转，太阳处在这个轨道的中央。”普卢塔克说，阿里斯塔克还讲过地球“同时绕着它自己的轴转动。”约在阿里斯塔克以后一个世纪，希帕克否认了日心假说，大概是因为看来它不能说明行星运动的无规则性（如地球上的观察者看到的逆行运动），他能够用“本轮”的理论令人满意地解释这种无规则性。因此，希帕克否认了阿里斯塔克的光辉的假说，虽然他保留大地的球形，但他从以太阳为中心的观点回到了以地球为中心的观点。

希腊的本轮和偏心说

希腊的天文学家欧多克索和希帕克以闻名的本轮和偏心说来解释行星的运动。绕着地球的外部行星的视运动是以两种运动的合成来描述的：（1）这个行星沿着一个称之为本轮的小圆周所作

---

〔1〕 关于中世纪时期地球是球形的观点见：Lynn Thorndike, *History of Magic and Experimental Science*, Vol. I, pp. 480, 481; Vol. II, p. 35, 861; J.L.E. Dreyer in Charles J. Singer's *Studies in the History and Method of Science*, Oxford, 1917—1921, Vol. II. pp. 102—120.

〔2〕 Sir Thomas Heath, *Aristarchus of Samos, the Copernicus of Antiquity*, London, 1920.

32 的年转动；（2）这个本轮的中心沿着绕地球的第二个圆周的运动。现在我们知道，这后一个圆周近似地描述了行星绕着太阳运转的真实轨道，而本轮的运动仅仅是视运动而已。这个视运动是由于地球本身的真实运动造成的。如果一个观察者绕着一个圆运动，那么，一个静止的物体在他看来是在一个相等大小的圆上运动。因此，这个古代的学说是近似正确的。希帕克注意到，如果一定要假定地球是精确地在上述讲到的第二个圆的中心的话，那末，本轮说并不能解释行星的运动。这就导致他建立了偏心说。

这个古代的体系是被一个著名的亚历克山大城的天文学家托勒密（公元100—178）精心制定和以他的名字命名的。这体系使地球固定在宇宙的中心。围绕着它旋转依次愈来愈大的是月亮球、水星球、金星球、太阳球、火星球、木星球、土星球以及最后的第八个恒星球。

哥白尼的研究

这个宇宙的地球中心说常常遇到它的反对者，但它受到的第一次猛烈攻击是来自**哥白尼**（1473—1543）。哥白尼可能是波兰人的后裔，他出生在靠近波兰国界的普鲁士的托恩(Thorn)。他从事于三重职业达十三年之久，这三重职业是履行教会的职务、行医和研究天文学。由于希望作出一种比托勒密体系所作出的较不复杂的解释，他热情地研究了他所掌握的所有学术史料。他研究了关于地球和行星运动的各种各样古代观点。人们并不普遍知道的是，哥白尼在他的著作中讲到日心说曾被阿里斯塔克讲授过。藉助于在古代史料中得到的启发，哥白尼逐渐地完成了他自

33 己的体系。多年来他不同意发表他的《天体运行论》(De orbium c(o)elestium revolutionibus)的稿本，但最后在1542年，他

同意将它印刷出版。他死于印刷完成之前。这就使他免受迫害。另外的一些人——布鲁诺和伽利略——不得不为哥白尼体系而受到迫害。

哥白尼讲道，地球是球形的，它绕着自己的轴自转，并绕着太阳公转；天体的运动要末是圆周的和匀速的，要末是圆周的和匀速的运动的合成。他第一次解释了季节的变化和行星视扰动的原因。他的体系的一个重大缺点是他认为，一切天上的运动都是圆周运动的复合。不能说，哥白尼所作出的反对托勒密体系的论点是结论性的。完全推翻古典的学说需要有另一个人——开普勒——的天才。

按照现代的观念，说日心说是“正确的”而地心说是“错误的”，这也不十分恰当。它们二者都是正确的，但代表了不同的观点。一种观点是，把太阳系中的种种运动的参照点（座标原点）放在太阳上；另一种观点是，把这些运动的参照点放在地球上。前者的处理方法胜过于后者是因为我们发现在描写太阳系的动力学方面它更为“方便”。

开普勒的归纳研究

开普勒（1571—1630）曾一度在布拉格当丹麦天文学家弟谷·布拉埃的助手。开普勒不象弟谷那样，没有观测和实验的才干。但他是一个伟大的思想家和出色的数学家。他吸收了哥白尼的思想，并且早就紧紧抓住行星的真实经迹问题的研究。在他的一些初次尝试中，他论述过毕达哥拉斯的信徒关于图和数的幻想。跟弟谷的交往使他放弃了这样的神秘主义并研究由他的老师所记载下来的关于行星的观测资料。他以火星为例进行研究，并发现，没有任何一种圆的复合运动会得出一条能跟实际的观测资料一致的路径。在一个例子中，观测值和他的计算值之间的误差是八分，他知道象弟谷这样精确的观测者不会做出这么大的误

34

差。他对火星尝试了一种卵形轨道，但又否定了它；他又以椭圆形轨道进行尝试，发现这是适合的！这样一来，经过四年多的刻苦计算之后，在尝试了十九种想象的路径并由于或多或少跟观测不一致而又都否定了它们之后，开普勒最后才发现了真实的轨道。它是一种椭圆！为什么事前没有想到它呢？在谜底一旦被揭开之后，这是多么简单的问题呀。他作出了闻名的“开普勒定律”，其内容如下：(1)每一个行星都在一个椭圆上运动，太阳处在这椭圆的两个焦点之一上（1609年发表）；(2)连结太阳和行星的矢径在相等的时间内扫过相等的面积（发表于1609年）；(3)任何两个行星运转〔一周〕的时间平方之比等于它们与太阳的平均距离的立方之比，即$T^2:T_1^2=D^3:D_1^3$（发表于1618年）[1]。由此看出，当假定太阳是固定的而行星是围绕着它运转时，这些定律得到了方便的表述。这些定律被那些天文学家们解释为推翻了托勒密体系。但只有在科学和神学之间的剧烈斗争之后，哥白尼体系才能被普遍地接受。[2]

35

力　学

史特芬的平衡原理

十六世纪目击了静力学的复兴和动力学的创立。自从阿基米德的时代以后，几乎停滞的静力科学首先被比利时的布鲁日

〔1〕第一和第二定律发表在开普勒的 *Astronomia nova*。见开普勒的*Opera*,ed.Frisch,Vol.111,*pp*.337,408；第三定律发表在 *De Harmonica mundi*,lib.V,Chap.3。见 *Opera*,Vol.V,*p*.279。

〔2〕关于这个斗争的描述，参阅 A.D.White, *The Warfare of Science with Christian Theology*,New York,1896,Vol.I.,*pp*.114—170。

(Bruges)地方的**史特芬**(1548—1620)发展起来了。史特芬是一个在科学上有各种造诣、有独立思想和对权威极少崇拜的非凡的人。他是小数的发明者。1605年在莱顿出版了他在荷兰写成的著作，1608年以题为《数学劄记》(Hypomnemata mathematica)译成拉丁文。史特芬准确地测定了使一个物体停放在斜板上所需要的力，并研究了滑轮组的平衡。他使用过力的平行四边形原理，但没有明确地把它形式化。实际上他掌握了关于平衡的全部学说[1]。名画家达·芬奇、乌巴尔迪和伽利略都对静力学相当重视。

伽利略的生平

动力学的创建是出生在比萨的**伽利略**(1564—1642)的功劳。他原在比萨大学研究医学，但在几年以后他放弃了医学的研究，搬迁到他的双亲的居住地佛罗伦萨，为了在那里从事更志趣相投的数学和科学的研究。在1859年，他接受了三年的比萨数学讲座的职位。在这期间他完成了值得纪念的关于落体的实验，但他的新观念遇到了这样强烈的反对，以致于他不得不在1591年被迫辞去讲座席位。从1592年到1610年期间，他是帕多瓦(Padua)的教授。正是在这里他制造了望远镜、显微镜和空气温度计。他用望远镜作了重要的天文观测。带着这些成就的光辉声誉，他离开了帕多瓦，并接受了图斯卡尼的大公爵(Grand Duke of Tuscany) [36] 的邀请，到佛罗伦萨当哲学家和数学家，不多几年以后，他跟教会的斗争就开始了。他勇敢地宣讲哥白尼学说，因此他被传唤到罗马的宗教裁判所。地动说受到宗教裁判所的谴责，伽利略受令要保持沉默。几年内，伽利略虽然总是在写作，但他保持

〔1〕 详见E.Mach, *Science of Mechanics* (ed.Mc Cormack), pp.24—34.

了沉默。违反1616年的禁令，伽利略在1632年发表了一本新著，即《对话》(Dialogo)，在这本书里非常成功地论证了赞成哥白尼学说的论点。这就招致他第二次受审。这个七十岁的老人遭受了侮辱、监禁和威胁。他被迫跪着当众表示"公开放弃、诅咒和痛恨地动说的错误和异端。"[1]。起先他一直和他的亲人以及朋友相隔离，但在他变瞎并病得十分瘦弱以后他才被准许有稍多一点的自由。[2]

伽利略最早教导人们不能把圣经当作科学教科书的人之一，他教导这样一种真理，即世界只能慢慢地去认识。

1632年以后的第一年他就开始动力学的研究。在1638年，不是在意大利而是在荷兰出版了他的论运动的对话，题为《关于力学和位置运动的两门新科学的对话》(Discourses on Two New Sciences pertaining to Mechanics and Local Motions)。现在人们认为这些对话是他的最伟大的和最重要的成就。

近来的批评力图从有些人怀疑是伽利略生平中的传说部分中37 挑选出真实的情况。他真的当着聚集在一起的大学生在比萨斜塔上做了实验吗？他真的计算了比萨大教堂里吊灯的摆动吗？关于他被宗教裁判所审判、忏悔和惩罚，有哪些是事实？由伽利略的学生维维安尼撰写的他的最早的传记可信吗？许多作者注意到了

---

[1] 引自A·D·White，见34页注[2] Vol.I.,*p*.142. 下跪忏悔以后，伽利略站起来，嘴里嘟哝着说："Eppur si muove"("可是它还在动呀")。在对各种文献作认真研究的基础上，伯托尔德(G·Berthold)得出这个结论：这个故事是一种传说。但毫无疑问的是，"可是它还在动呀"[这句话]表达了伽利略必然深藏在内心中的信念。见Berthold,*Zeitschr.f.Math.und Phys.*,Vol.12,1897，*pp*.5—9；R.Wolf，*Gesch.d.Astronomie*，München,1877，*p*.262.

[2] A·D·White同34页注[2]*pp*.142,143.

这些和其它许多问题，特别是德国人沃尔维尔[1]和意大利人安东尼奥·法瓦罗，后者是大部头的二十卷的伽利略著作国家版的编辑，在我们已经讲过的有关伽利略的生平中部分地预示了对这些问题的回答。

伽利略在斜塔上的实验

伽利略在比萨斜塔公开做了实验，这是以他的学生维维安尼的著作为依据的，维维安尼仅仅是在伽利略一生的晚年才认识伽利略的。在怀疑这件事是传奇的时候，沃尔维尔查阅了许多其它的资料来源，使他奇怪的是，在和维维安尼同时代的作家中，有四个人写到了落体问题，但都没有讲到伽利略作了这样的公开实验。当然，这四个作者没有写过伽利略的生平，没有叙述过比萨实验，这一不足之处，并没有证明写过伽利略传记的维维安尼的错误。沃尔维尔坦率地承认，由这个证据本身不能作出定论。他还审阅了伽利略可能是在比萨讲学的第一年期间写下的题为《论运动》的论述运动的长篇论文。伽利略从未发表这篇论文；它是在纪念伽利略逝世200周年时第一次出版的，并且被编入到法瓦罗的国家版的第一卷之中。沃尔维尔认为《论运动》显然是不成熟的作品，它表明伽利略心中的不确定状态，这种状态跟维维安尼赋之于伽利略的那种使他能在比萨公开实验的敢作敢为和挑战姿态是不相容的。从《论运动》的研究中，沃尔维尔断定伽利略决没有公开进行比萨实验。法瓦罗的结论不是这样，他从伽利略的毕生研究和许多史料的记载中发现维维安尼的叙述还是十分可靠的。我们自己关于《论运动》的研究得出的推论跟沃尔维尔不同。的确，年轻的伽利略关于物体在真空中运动的观念是有缺点 38

[1] Emil Wohwill, *Galilei und Sein Kampf für die Copernicanische Lehre*, Vol.1, 1909, pp.80—118.

的。他受到了西班牙籍的阿拉伯裔哲学家阿维罗伊的观点的影响，阿维罗伊认为，在真空中较轻的物体下落得较快。在这里，思辨过头了，因为没有直接求助于在当时可能的实验。但在通过空气下落的条件下，当伽利略能够进行实验时，《论运动》表明了伽利略获得了清楚的、十分准确的、也是令人信服的关于落体的结论。虽然伽利略在他的著作中的从来没有特别地引述比萨斜塔实验，在他的《论运动》中讲了六次关于物体从塔上——“从塔楼”(ex turri)、“从高塔”(ex alta turri)、“由高塔”(ab alta turri)——落下的实验。他主张对亚里士多德采取批判的态度。在十章中，他在一开头就表明他对亚里士多德(the Stagirite)* 的学说的强烈反对："反对亚里士多德"，"关于亚里士多德有错误的证明"。他嘲弄那些人，他们"认为有些事情理所当然是对的，仅仅因为亚里士多德是这样说的"。这些话是一个富有热情的年轻人毫不犹豫地在大学集会上论证亚里士多德的错误所讲的。我们有把握作出维维安尼关于比萨实验的叙述是正确的这样一种结论。

对亚里士多德落体定律的批评在大学中遭到了反对，看来是伽利略决定给他的反对者以一个直观的证据。他以青年人的热诚、勇敢和直率做了这个实验。正如维维安尼说的，他"在有其它的教授、哲学家和全体学生在场的情况下，从比萨塔楼的最高层重复地做了多次实验"，他证明了，在计及空气阻力时，物体都以同样的速度下落。近代关于这些实验的叙述中，真伪可疑的是伽利略所用的弹丸的精确重量的陈述。这些陈述可能是出自伽利略在1638年（约47年后）写的《对话》中的一节，他让沙格里多**(Sagredo)说："但是I，做过这个实验的辛普里丘**(Sim-

* Stagirite，原指亚里士多德的出生地 Stagira，此处指亚里士多德。——译者注。

** 沙格里多和辛普里丘是伽利略《对话》书中的两个人物。前者支持伽利略的观点，后者支持亚里士多德的观点。——译者注。

plicio）能证实你的结论：在200腕尺的高度同时下落的一个一百或两百磅甚至更重的炮弹不会比一个只有半磅的枪弹会稍微提前一点点的时间落到地面。”[1]

必须强调指出，在伽利略以前的时代，虽然一般都接受亚里士多德的落体定律，但也不是普遍地承认它。法国人N·奥勃斯姆、葡萄牙人A·托马斯、和牛津的教授W·海特斯伯格，以及可能还有达·芬奇都得到了落体的正确见解。[2]就我们所知，这些人都没有作过实验。根据他们对运动物体的一般的观测推论，他们得到了这个关系式 $S=\frac{1}{2}gt^2$。伽利略的伟大成就是把着重点放在实验方面，因此排除了一切怀疑。他对实验的强调使物理学发生了革命性的变化。

伽利略的《关于两门新科学的对话》

然而，伽利略的《关于两门新科学的对话》的有意义的特点是，这本书不单纯是实验资料的陈述；它还包括了许多演绎推理。例如，在讨论到等加速运动的性质时，就产生了这个问题，速度是比例于通过的距离吗？伽利略不是以实际的物理量度来回答这个问题，而是以一个可以称之为理想实验来回答这个问题。“如果走过四码远的一个物体的速度是它经过前两码时速度的两倍，那么，这两个过程所需要的时间应当相等；但只有当有一种瞬时运动，在和走过两码相同的时间内才能达到四码远，然而，

〔1〕 见 Henry Crew and Alfonso de Salvio 的译本，题为 *Dialogues Concerning Two New Science*, New York, 1914, *p*.62. 德文翻译在 *Ostwald's Klassiker der exacten Wissenschaften* Nos.11,24,25.

〔2〕 见H·Wieleitner in *Zeitschrift fur mathematischen und Naturwissenschaftlichen Unterricht*, Vol.44,1913, *pp*. 209—228。

我们看到，物体在下落过程中所需要的时间，确实是落下两码比落下四码费时较少。所以那种速度的增加是比例于落下的距离的说法是不正确的。”[1]

伽利略然后作了第二个假定——即速度是比例于下落的时间——他发现在这里没有自相矛盾之处，他要用实验来证实这个假定。他用一块十二码长的木板，木板中间割划出一吋阔的笔直的沟槽，并以非常光滑的羊皮纸覆盖它。让一个滚圆而又光滑的黄铜球从这斜板上滚下。他以不同倾斜度和不同长度的板作了百次左右的试验。他发现了黄铜球下落的距离总是非常近似地〔比例〕于时间的平方。讲讲伽利略如何量度时间是一件有趣的事。那时，还没有精密的钟或表。他在一只水桶的底部装上一个很小的管道，在物体通过给定的距离运动的时间内，他让水通过管道流进杯子里。精确地秤出水的重量，降落的时间就比例于已秤定的水重。[2]

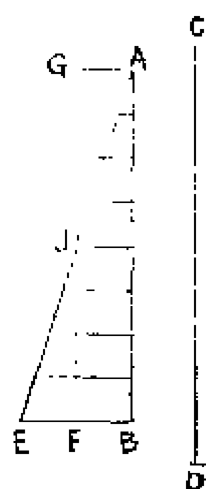


图 3

为表示速度和距离之间的关系，伽利略建立了如下的定理：一个物体从静止开始以匀加速度运动，经过一个给定的距离所需的时间和这个物体以相当于它的实际末速度的一半的匀速运动同样的距离所需要的时间相等。他以图3来说明这个道理。[3] 以线 EB 表示直接随着 AB 所表示的时间而变化的末速度。面积ABE 代表给出的距离。这个面积显然等于矩形 ABFG 的面积，而 FB代表平均速度。这个几何说明图还保留在一些现代的教科书中。更为一般的是表示一个水平地抛出的并受到重力作用的物体路径的图解[4]（图4）。在关于这个问题的对

〔1〕 见Crew and De Salvio 同上页注〔1〕.p.168.

〔2〕 同上. p.179.

〔3〕 同上. p.173.

〔4〕 同上. p.249.

话中，伽利略通过沙格里多的口天真地讲道："这个概念确实是新颖、巧妙和机敏的；根据假定，即横向运动不变；而在相同的时间内，它自身自然地保持着加速运动，这个运动和时间的平方成比例，并且这样的运动的合成确实彼此间不发生干扰、变化和妨碍，以致最后，随着前进的运动，这个抛射体的路径不会变形——对我来说，这种行为是好容易才理解的。"

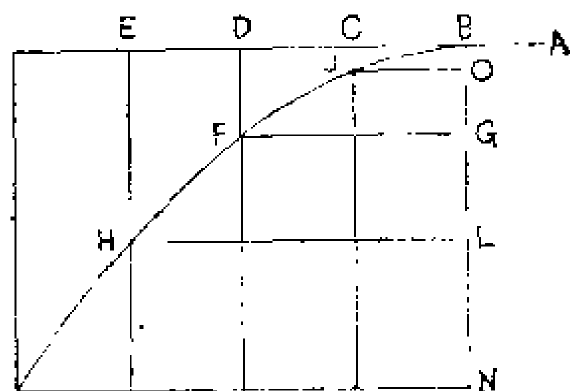


图 4

伽利略第一个证明抛射体的路径是一条抛物线。在这之前某些人认为炮弹首先以直线向前运动，然后突然垂直地落到地面上。

伽利略领悟到离心力，并作出了动量的正确定义。强调动量是动力学中的一个基本量，这是头等重要的。他以速度和重量的乘积来度量动量；质量是后来惠更斯和牛顿的概念。就单摆的摆动而言，伽利略说："沿着一个弧降落时所得到的每一个动量等于能促使同一个运动物体通过同样的弧上升所需的动量。"他对抛射体路经的解释表明，伽利略已掌握了运动第一定律和第二定律，但没有把它们概括出来，以便把它们应用于不受地心引力影响的物体。这一步是牛顿做的。"惯性"一词被开普勒用过，但把它使用到静止的物体上。[1]运动第一定律现在常叫做惯性定律。

伽利略虽然改正了亚里士多德的一些错误，但他没有完全掌握运动第三定律，即作用和反作用相等的定律。在他的《对话》的第六天讨论到了这个题目。需要强调指出，伽利略并没有提出第三定律，因为在最近的一些通俗科学出版物中讲到了这个定律是伽利略的光辉成就之一。

---

[1] Kepler, *Opera Omnia*（法文版）Vol. VI., p. 311, 312.

跟史特芬和其它人一样，伽利略也论述过静力学。他表达了力的平行四边形原理，但他没有充分认识到它的广度。

引起伽利略注意的另一个问题是摆的定律。如同落体的情形一样，他在这方面的第一个观察也是在他年轻时做的。传统的说法是在1583年，当他在比萨教堂祈祷时他的注意力被点亮以后还在摆动的大油灯的运动所吸引。伽利略以在他仅有的表即他自己的脉搏来计算油灯摆动的时间。他发现，在他所能辨别的限度内，即使运动已大大地减弱，摆动时间也还是相等的。这样，伽利略就发现了摆的等时性。伽利略当时正在研究医学，他就把这种摆用来测量病人的脉搏。他还建议把它应用到天文观测上。更为仔细的实验是他后来进行的，并在他的《对话》中做了描述，这些实验证明，摆动的时间不依赖于摆的质量和材料，而是随着摆的长度的平方根而改变[1]。他对时间量度技巧的最大贡献是在他变成瞎子以后做的。在1641年他指令他的儿子维琴佐（Vicenzo）和他的学生维维安尼描述并绘制摆钟的图样。这原始的图样现在还保存着，但其模型已经失存了，据说这个模型是维维安尼在1649年做成的。伽利略的发明在当时并未成为众所周知的事，15年以后，即1656年，惠更斯独立地发明了摆钟，它得到了迅速和普遍的重视。因此，这项伟大发明的荣誉是属于伽利略和惠更斯两个人的。[2]

---

〔1〕 见Crew and De Salvio, *p*.96.

〔2〕 还有人主张，摆钟的发明是属于比尔吉（见R.Wolf, *Geschichte der Astronomie*, 1877, *p*.369），伦敦的哈里斯（*Edinburgh Encyclopoedia*, 1830, Vol.11, *p*.117），和其它人，但是这些主张被后来许多权威性的典籍否定。关于这个发明的历史，参阅 E.Gerland. *Zeitsch.f.Instrumenten Kunde*, Vol.VIII., 1888, *p*.77; W.C.L.v.Schaik, 同上杂志, Vol.VII., *pp*.330, 428; S.Günther, *Vermischte Untersuchungen*, Leipzig, 1876, *pp*.308—344; G.Berthold, *Schlomilch's Zeitschr.*, Vol.38, 1893, Hist.Lit.Abth., *p*.123.

伽利略的1638年的《对话》是通俗说明的佳作，仅就这个事实就值得拿出它来精心阅读。然而，这本书还有其它的优点。W·G·亚丹斯说得好："伽利略建立动力学最初的一些原理并把它们展示给他的学生们的方式是教授力学的正确方法。由于实验力学和理论力学二者都涉及重量，因此，把这一课题交给学生们的最好方式是使学生们同时听取实验课和理论课这两门平行而又有区别的学科。"[1]

在他的同时代人中，他所以得到赞扬，主要是因为他在天空中发现了许多新奇的东西，但是，拉格朗日认为，他的天文学上的发现只要有一个望远镜和耐性就行了，而在动力学方面，从我们经常看到的现象中发现规律是要有超凡的天才的，因为关于这些现象以往所有的哲学家都没有作出正确的解释。

光　学

44

望远镜和显微镜的发明

文艺复兴时期光学上的最大成就是有助于观察者瞥见无限远处和无限小的仪器的发明。我们指的是望远镜和显微镜。

按照传说，望远镜是偶然发明的。伟大的惠更斯在他的《折光学》中声称，一个人如果能够仅仅以纯粹的思考和应用几何原理来发明望远镜，而不是偶然的遭遇，那他就具有超人的天才。马赫对这句名言补充道，这不是说，仅仅有偶然的遭遇就足以产生一个发明，这个发明者"必须突出新的特征，把它铭刻在他的记忆中，把它跟他的思想的其余部分结合并交织在一起；简单说来，他应当具有向经验学习的能力。"[2]

---

〔1〕 *Nature*, Vol. V., 1871—1872, *p*. 389.

〔2〕 E. Mach, "On the Part Plaed by Accident in Invention and Discovery," *Monist*, Vol. VI., *p*. 166.

为了争取发明这些神奇仪器的荣誉已提出了许许多多候选人。英国、意大利、荷兰和德国这四个国家，每个国家都努力争取有利于自己同胞的决定。

我们有有利于荷兰人的证据。第一个望远镜可能是由出生在韦塞尔(Wesel)的米德尔堡(Middleburg)的眼镜制造师H·利佩尔兹海在1608年制造的[1]。他不是用玻璃，而是用的水晶制造了他的透镜。在海牙档案馆发现的一份文件表明，他在1608年10月2日请求过专利。人们要他修改他的设计，做一个观察者能以双眼通过它来看的仪器。他在同一年完成了这个仪器的制造。他没有得到他的专利，但荷兰政府为这仪器付给他900古尔登，为他在1609年完成的两个其它双筒望远镜付了同等的金额，以此代替专利。[2]

---

〔1〕 Dr. H. Servus. *Die Geschichte des Fernrohrs*, Berlin, 1886, p. 39.

〔2〕 同上，p. 40，现在人们普遍地放弃了那种认为望远镜是由罗吉尔·培根发明的说法。闻名的暗箱发明者、意大利人德拉·波尔塔在他的《自然的魔术》（1589年第二版）书中几节有关强度的论述里提到这种效应：通过一个凸透镜和另一个凹透镜两者的适当组合，远距离的物体以及近在咫尺的物体都可以在眼中放大。但看来他的实验限于为视力不正常的人配制适当的眼镜；望远镜的发明在这里还谈不上。1571年，布里斯托尔(Bristol)的L.迪格斯出版了一本有点类似于1589年波尔塔的书，在这本书里，对凹透镜和凸透镜的组合效应作了解释，但是所有这一类论述肯定只能看作是为望远镜的发明作了准备，还不能说实际上制造了望远镜。关于1831年以前的现有的最有利的证据似乎是倾向于荷兰米德尔堡的Z·约安尼代斯是望远镜的发明人，虽然他的同胞A·梅蒂乌斯和C·德勒贝尔，德国人S·马里乌斯和开普勒，以及意大利人F·丰塔纳和伽利略，都有他们各自的支持者。除开普勒以外所有这些人，实际上都从事过望远镜的制作。

显微镜的发明和望远镜的发明几乎是同时代的事情。现在通常认为它是由Z·约安尼代斯和他的父亲发明的，虽然惠更斯把这归功于C·德勒贝尔。[1]起初，目镜是由凹透镜组成的。那不勒斯的F·丰塔纳看来是第一个用凸透目镜代替凹透目镜的人。建议在望远镜中作同样改变的第一个人是开普勒。我们讲到的有关发明显微镜的所有技师在制造望远镜方面也是杰出的人物。 45

新仪器的使用很快就传遍了欧洲。在英国，数学家T·哈里奥特有放大五十倍的望远镜，他在1610年观察到了木星的卫星， 46 差不多同伽利略一样早。[2]

望远镜的发明消息激励了作了多年光学研究的开普勒作新的努力。1611年他出版了他的《折光学》，这是一本包含尝试性的阐明望远镜理论的最早著作。这样的一种尝试需要有关折射定律的

[1] 戈维主张显微镜是伽利略发明的。他从1610年出版的一份材料中证实了伽利略把他的望远镜修改到可以看到非常小又非常近的物体。关于这个问题参阅戈维在*Rendic*.*Accad*.*Napol*.,(2)I.,1887；C.R.107，No.14,1888；Poske's *Zeitschr*., *Zweiter Jahrgang*.1888.*p*.93。伽利略在他的于1610年初发表的文章《恒星使节》中说，他第一次听到望远镜的发明"大约在十个月前"。他的显微镜是修改了的望远镜。因此，他的显微镜应是在1609或1610年做成的。现在，如果我们可以相信荷兰大使博雷利乌斯(Borelius)在1655年写的信件中所得到的证据，那么约安尼代斯在1610年以前没有制造望远镜，"在很久以后"（过了一个长时间以后）他发明的是显微镜。见H·Servus，前14页注[2]*pp*.17，18.按照这个说法，约安尼代斯是受到伽利略的启发。

[2] 在1585年，W·雷利爵士派哈里奥特作为一个测量员跟R·格伦威尔爵士的探险队到弗吉尼亚(Virginia)。在许多数学仪器中有一些仪器引起了这个长期居住印度的英国人的惊讶，哈里奥特说："一块透明的玻璃怎么会看到许多奇景。"见*Dic*.*of Nat*.*Biography*.

知识。开普勒获得了只是近似的经验表示。他象托勒密和阿勒·哈增一样，没有发现精确的折射定律。他的关于小角度($i<30°$)的近似结果是$i=nr$，这里，n是一个常数，在光线从空气到玻璃时它等于3/2。这个值已准确到足以使他能够概括地作出望远镜的正确理论。

望远镜在科学研究中的第一次应用

伽利略最早藉助于望远镜作出了重要的科学发现。关于在比利时发明了一种仪器，通过它能看清遥远的物体的传说，传到了伽利略耳边。在这个传说的影响下，伽利略开始了这方面的研究。他可能听到了这个仪器是由一个凹透镜和一个凸透镜组合作用的结果，他开始自己着手设计这样的仪器。在他接受到的启示和他的折光学知识的引导下，他很快就成功了。他把两片透镜（二者均有一面是平坦的）安装在铅管的终端，做成一个简陋的望远镜。一块透镜的另一面是凹形的，另一块透镜的一面是凸形的。这个望远镜使物距缩短为1/3而把物体放大了9倍。随即，既不节省经费，也不吝惜劳动，他造了这样一个望远镜，它使物体放大到近千倍，并使物体近了三十多倍[1]。

伽利略到了威尼斯，并把他的仪器给绅士们看。他说："许多贵族和元老院议员，虽然年纪很大，但只要他们登上威尼斯的最高教堂塔顶去看看船队，那么用我的望远镜就可以看见进入港口之前二小时的船队。"

许多人索求伽利略的望远镜。他接受了许多学者、公爵和政府的定货——望远镜的故乡荷兰也不例外。[2]

---

〔1〕参阅1610年的*Sidereus Nuncius*，它再版了伽利略的著作；也见Karl von Gebler，*Galileo Galilei and the Roman Curia*，由Mrs. George Sturge翻译，London，1879，*p*.17.

〔2〕见Gebler，同上*p*.18.

伽利略把望远镜对准月亮，发现了许多山岭和火山口；他把它对准木星，看见了它的卫星(1610年1月7日)；他把它指向土星，看见这行星大了三倍——现在明白，这是由于没有完全看清土星环的缘故；他察看了太阳，看到了它的黑子的运动，并作出了太阳在转动的结论。所有这些都是在1610年取得的成就。他的观察似乎证实了哥白尼学说。反对伽利略的乌云也开始聚集起来。一些人拒绝相信他们的眼睛，并且断言，虽然用望远镜看地上物体是足够好的，但当它指向天体时，就变成虚妄和幻觉了。另一些人拒绝用望远镜看东西。在后一种人中有一个大学教授。伽利略给开普勒的信中写到：“哦，我亲爱的开普勒，我多么希望我们能在一起尽情大笑！在帕多瓦这地方，有一个主要的哲学教授，我一再急切地请求他用我的望远镜看看月亮和行星，他固执地拒绝了。为什么你不在这里？对这种极顶的傻事我们将笑痛肚子！要是听听比萨的这个哲学教授在大公爵面前所作的逻辑论证，似乎是魔术的符咒变出天空中的新行星。”[1]对伽利略和他的可恨的望远镜的敌意变得更加强烈。牧师们开始斥责他和 48 他的方法。神父卡西尼说：“你伽利略这个人，为什么坚持要凝视天国？”[2]他以这句话为主题讲道，从而成为一个闻名的善于讲双关语的人。

电　和　磁

吉尔伯特的实验

和“现代物理学的创始人”伽利略相比，我们可以把吉尔伯特称为“关于磁的哲学之父”。英格兰埃塞克斯郡科尔切斯特的

---

〔1〕这段译文出自O. Lodge, *Pioneers of Science*, 1893, p.106.

〔2〕A.D.White, 同34页注〔2〕Vol.I., p.133.

威廉·吉尔伯特（1540—1603），曾在剑桥圣约翰学院学习，以后又到欧洲大陆去旅行。在欧洲大陆，以及在英国，他“是一个具有很大成就和声誉的医生”。伊丽莎白女王任命他为她的私人医生，她定下了他的年薪，目的是帮助他能从事他的哲学研究。他的最初的研究是在化学方面；但后来，花了十八年或更长的时间，进行了关于电和磁的实验。在1600年他出版了他的巨著《论磁》。J·F·W·赫谢尔讲过，这本书“充满了有价值的事实和天才地论证了的实验。”它是在英国诞生的第一部伟大的物理科学著作。伽利略声称，它“伟大到令人妒忌”。但是，在他本国，它没有受到这么高的评价。[1]在随后的几代里，这本书就完全被遗忘了。

在吉尔伯特的著作中处处流露出他对经院哲学家的方法的蔑视。事实上，他对可敬的前人的批评有时是狭隘的。他多年不同意发表他的著作。在他的序言中，他说：“我为什么要送出这个高贵的和……新的、不能得到承认的哲学去受发誓要追随别人观点的那些人的审查，去屈从于艺术上最无思想的腐朽人物，屈从于那些学究气的小气鬼、语法家、诡辩家、演说家和没有头脑的乌合之众，让他们来斥责、批驳得体无完肤和滥加侮辱。仅对您们这些真正的哲学家、那些不仅从书本上，而且从事物本身中寻求知识的天才人物，我才把磁性科学的这些基础——一种新的哲学概括的体裁——奉献给您们”（第xlix页）。现代的哲学家“必须放弃那种仅仅从书本上得到的并仅仅以关于可能性的空洞的论证和以猜测为根据的知识”（第47页）。“有敏锐智慧的人，倘

---

［1］ 见William Gilbert of Colchester, *On the Loadstone and Magnetic Bodies, and on the Great Magnet, the Earth*, P·F·Mottelay 翻译, London, 1893, “Biographical Memoir” pp ix—xxvii。我们的全部引文都出自 *De Magnete* 这个版本。

若没有关于事实的实际知识并且不进行实验，那是容易犯错误的”（第82页）。吉尔伯特是第一个用“电力”、“电吸引”、磁“极”等术语的人。他把象琥珀这种能吸引的物体称之为“带电体”。他把金属和其它一些物体称为“不带电体”，因为他不能用摩擦使它们具有吸引的能力。

学生们在开始学习物理学时，往往不能分辨磁作用和电的吸引或排斥。历史表明某些古代的作家也犯同样的错误。对这二者的区分首先是由米兰的数学家**卡丹诺**（1501—1576）明确地作出的。[1]英国作家通常称他为卡丹。吉尔伯特抱怨那些人，他们“不知道磁石运动的原因十分不同于琥珀所具有的特性”（第75页）。意大利的巴普蒂斯塔·波尔塔(Baptista Porta)讲过跟金刚石摩擦过的铁能指向北方，犹如它是在磁石上摩擦过的一样。对此吉尔伯特讲道：“我们在许多见证人面前以75个金刚石作了我们自己的实验，用一些铁棒和铁丝，当用软木塞托住它们使它们浮在水面上时，我们非常小心地巧妙地摆弄它们；但是我从没有能够看到波尔塔所讲的效应”（第218页）。吉尔伯特对卡丹发起舌战，卡丹“提出为什么没有被任何石头吸引的其它金属，而卡丹的回答是由于没有一种别的金属象铁那么冷；如果冷的确是吸引的原因，或者铁的确比铅冷得多，所以铅既不会尾随磁石移动也不会倾向磁石。但这是可悲的废话而已，它不比老太婆的聊天强多少”（第101页）。“针通过中介的火焰朝向磁石的移动并不比只有空气作中介时的移动快些，也不更急切些”（第107页）。于是，他做了这样一个有趣的观测，“但当铁本身是灼热的时候，它当然不会被磁铁吸引”，虽然当铁“多少降低一点温度时，它就立即被吸引了。”（第107页）。一些现代的教科书还讲了吉尔伯特所做的关于磁化铁棒或铁丝的精致的实验，通过“拉伸或锤击”，或通过锤击正在从灼热中冷却下来的铁，结果

50

〔1〕 参阅P·Benjamin，同11页注〔2〕p.249.

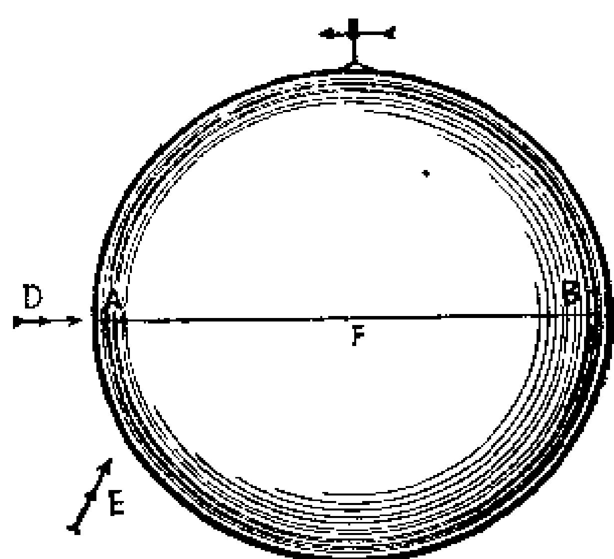


图 5
吉尔伯特的“磁性小地球”

是铁棒或铁丝指向北和南（第211页，212页）。

吉尔伯特关于地磁的实验是划时代的。我们应该把象一个大磁体一样的这个“新的而且到现在还是前所未闻的关于地球的观念”（第64页）归功于他。[1]吉尔伯特部分追随了佩雷格伦纳斯的步骤，用一个球状小磁石。他把有枢轴的磁针放在这个磁球的附近，他观察了磁球施于磁针的指向力和吸引力。在这小小的球体上他发现了许多地球的性质。因此，他把它称为 51 “小地球”（terrela）。“天然磁石对这个球具有特有的吸引、极性、转动的作用，并具有按照整体的规律在宇宙中取适当位置的作用”（第66页）。“象我们在地球上看到的情形一样，磁体从各个方面倾向它，并固着在它上面”（第67页）。“如同地球一样，它有一条赤道，……〔它〕有指向力并还是指向北和南”（第67页）。

因为地球有磁极，由磁作用定律推论出磁针的北指极是南极；“所有的仪器制造师、航海家，在把天然磁石的北极当成磁石倾向北方的部分时显然是错了”（第27页）。吉尔伯特关于地球是一个大磁体的发现轻易地解释了为什么磁针指北。在吉尔伯特之前，人们曾提出各种各样的理由。“在研究磁体运动的原因时，哲学家们的共同想法认为是相隔遥远的原因。M·科特修斯……梦想天国外有一有吸引力的磁点作用在铁上。佩雷格伦纳斯认为它的方向起源于天极。卡丹的观点是，铁的转动是由大熊

〔1〕 地球有磁极之说是在1546年由麦卡托提出来的。但是麦卡托对这个问题的论述直到1869年才发表。它再版于 Hellmann's *Neudrucke*, No.10, Berlin, 1898。

星座尾部的星星引起的。法国人伯萨尔德认为磁针指向黄道带的极……。人们的习惯从来就是如此，本国的东西是不足道的，从海外来和远处来的物品对他们来说是贵重的，是他们渴望的对象”（第179页）。

吉尔伯特是哥白尼体系的坚决的拥护者。他的书的一个目的是提供支持新学说的补充论据。他的实验显示出彻底下了苦功的那种精确性，但他把他的实验结果用到宇宙哲学上是不得要领的。因此，他努力去证明地球自转是由于它的磁性。毫无疑问，这些不恰当的思辨是他的书很长时间受到不恰当的忽视的原因。

不同地方的不同的磁偏角、磁倾角

52

中国人早在十一世纪就知道磁针不会指向真正的南或北。哥伦布在他1492年令人难忘的航行中明确地认识到磁偏角的变化。人们正式承认，在1436年由A·布兰科发行的一本地图集中揭示了从前认为磁偏角不是到处都相同的知识，但是伯特里否认A·布兰科的这种知识，并且以不同的方式解释了〔磁偏角的〕变化所显示的修正。[1]哥伦布的确第一次在距亚速尔群岛之一的考娃岛(Corvo)不远处发现了没有磁偏角的地方，从而使它出了名。B·波尔塔还认为磁偏角是随经度而有规则地变化，因此地球的经度可以从观测到的磁偏角轻易地推算出来。吉尔伯特手中的资料表明，这“是荒谬得不能再荒谬了”（第251页）。可是，吉尔伯特自己在假定任何一个地方的磁偏角都是不变的，并且在认为地磁赤道和地理赤道相同、以及认为等磁倾线和地理纬度一致方面犯了错误。这些例子表明，思辨的嗜好而不用“精确的实验”来检验结果，经常牢牢地控制了甚至象吉尔伯特这样的人物。

---

〔1〕 Bertelli, *Sulla Epistola di P·Peregrino*, Rome, 1868, mem. 111.,77; Benjamin, 同11頁注〔2〕p.197.

人们通常认为磁倾角的存在是R·诺曼在1576年发现的，诺曼是布里斯托尔的“一个熟练的航海家和天才的技师”，他在1581年的题为《新吸引》的论著中公布了这件新事实。诺曼的论著在1581年被W·巴勒出版时加上了一篇附录，巴勒格外详细论述了发现磁偏角的法则。赫尔曼认为磁倾角是G·哈特曼在1544年发现的，但又承认哈特曼的测定是非常不精确的。哈特曼的信函直到1831年才发表。[1]

53

气 象 学

最早的系统的气象记录之一是天文学家第谷·布拉埃于1582—1597年间在他的布拉格天文台做的。[2]用于天气观察的仪器还很少。最早是在希腊人中发现的风向标被放在基督教欧洲的教堂尖塔顶上，并且作成一只公鸡的形状，因为鸟是教士警戒的象征。[3]

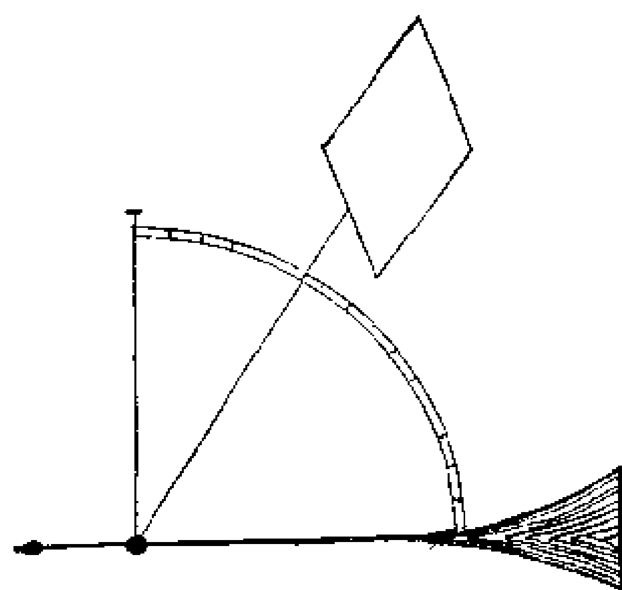


图 6

约1570年天文学家E·丹蒂在波洛尼亚和佛罗伦萨竖立了几个用于测定风力的摆动风速计（见图6）。在现代，这个仪器在欧洲已被广泛地使用。它的第一个发明人时常被误认为是R·胡克。[4]

---

〔1〕 哈特曼的、诺曼的和巴勒的有趣的论文再版于Hellmann's *Neudrucke*, No.10.

〔2〕 G·Hellmann, *Himmel und Erde*, Vol.11.,1890,*p*.113,etc.

〔3〕 同上,*p*.119.

〔4〕 同上,*p*.121; Sprat, *Hist.of Royal Soc.*,1667,*p*.173.

在德国的主教**尼古拉·德·库萨**（1401—1464）的著作中描述了已知的最早的验湿器。他说：“如果你在大天平的一边悬吊大量的羊毛，在它的另一边挂上一些石头，让它们在干燥的空气中重量相等，然后，你会看到，当空气趋向潮湿时，羊毛的重量增加了；当空气趋向干燥时，羊毛的重量减少了。”意大利人认为第一个湿度计的发明人是达·芬奇。约在十六世纪中叶，米佐尔德[1]讲过肠线的潮湿效应。从此以来，人们在测湿计设计中 54 就反复使用它了。约在同一个时候，B·波尔塔注意到了野生的燕麦芒的验湿性质。他看见孩子们把燕麦芒糊在小纸片上，由于空气的干燥或潮湿，这纸片会弯成这种状态或那种状态。在十七世纪初期野生燕麦被广泛用作验湿的物质。

科学研究的归纳法

在**弗兰西斯·培根**的著作中强调了观察和实验在科学研究中的必要性。培根是一个有卓越的文学天才的人，在他的关于科学方法的著作中有许多光辉的片段，有名的作家都乐于用这些片段来装饰他们自己的扉页和篇章之首。不熟悉科学发展史的人们甚至认为，重新唤醒世界、推翻亚里士多德的物理哲学，并把归纳法引进科学之中的功劳应主要归于弗兰西斯·培根和他的《新工具论》。T·B·麦考莱写道[2]：“《新工具》这本书同时包容了科学的各个领域——所有过去的，现在的和将来的科学，两千年来的各种错误，过去的一切鼓舞人心的征兆，对未来时代的所

〔1〕 *Ephemerides aëris Perpetuae*, Lutetiae, 1554, p·49; Hellmann, 同上页〔1〕p·122.

〔2〕 T·B·Macaulay, *Essays*, 1855, Vol. Ⅱ., pp·142—254 (*Edinburgh Review*, July 1837); *Miscellaneous Works of Lord Macaulay*, Vol. 2, New York, 1880, pp·455, 456.

有光辉的希望。”培根“激励了那些改变了世界的有识之士。”

实际上，培根不是一个科学家，在实验方面他没有什么实践经验；他缺少从细节上探求伟大真理——即人们必须以观察和实验来直接研究自然——的科学才能。他似乎拒绝哥白尼体系，他轻视伽利略和吉尔伯特的研究，而伽利略和吉尔伯特是他那个时代两个最伟大的实验家。他看到“吉尔伯特试图在磁的基础上提55出普遍的体系，力图用不足于做成一只小艇的材料来建成一条大船。”[1]培根从事于作出一个绝对可靠的法则，使任何有坚韧不拔精神的人都能依据这个法则作出科学的发现。我们“必须以适当的否定和排斥来分析自然，然后，在足够数量的否定之后，得出一个肯定实例的结论。”[2]他认为自然界是能以法则来研究的，用不到假说和科学想象的帮助。对培根的方法进行最严厉批评的科学家是化学家J·李比希[3]，他说：“培根的意思是，从事实验的人们并不知道在寻求什么而进行实验，为此他们努力作比较是没有动机的，他们的结果因此也是没有目的和目标的。”“正如培根所认为的那样，真正的方法并不从许多实例出发的，而是从单个实例出发的；当这个实例被解释了，所有类似的实例也都被解释了；我们的方法是亚里士多德的老方法，仅仅是应用了广博得多的技巧和经验……。”“以他的方法所得到的结果总是等于零。”“这样的一种程序决不能导致真理的发现。”“自然科学的真正的方法要排除偶然性（Willkür)，并且是跟培根的

---

[1] Fracis Bacon, *De augmentis scientiarum*.

[2] *Novum Organum*, I., Aphorism CV.

[3] Justus von Liebig, *Ueber Francis Bacon von Verulam und die Methode der Naturforschung*, München, 1863, *pp*. 11, 47, 48.

方法截然相反。"伟大的德国化学家E·马赫的名言是这样的[1]，他说："我不知道是否在拉加多(Lagado)的谋士们的斯威夫特(Swift)的学院（在这个学院中伟大的发现和发明是通过一种言语上骰子游戏而做出来的）是否要对弗兰西斯·培根的那种用一些作家作出大纲表的发现方法进行讽刺。的确，它没有找错对象。"类似的观点由G·H·达尔文[2]，A·德·摩根[3]和O·洛奇[4]讲述过。 56

这么大的赞赏和非难必定意味着有巨大的价值和巨大的缺点。这是可以肯定的，培根是一个最早的卓越的科学研究的方法论学家。培根坚决主张，人们应当记住他们失败的时候，也要记住他们成功的时候；他们应当观察许多实例，——观察得愈多成功的机率就愈大。他将他的方法比喻为一只圆规，它能使任何一个初学者都能用它划出一个完整的圆。不用说，他的方法没有坚持经验的检验。在实际从事物理学研究方面，人们并没有普遍地信奉它。但在动物学和植物学方面，在查理·达尔文之前，它被广泛地应用在分类工作上。然而，这门科学的巨大进展是藉助于查理·达尔文提出的假说才实现的。

J·S·米耳承担了对培根论述的科学方法论进行修正的工

---

〔1〕 *Monist*, Vol. VI, 1893, *p*·174. 更详细的内容参阅Jevons, *Principles of Science*, 1892, p.507; p·Duhem, *L'Évolution des Théories Physiques*, Louvain, 1896, *pp*.8—10; Justus von Liebig, *Reden und Abhandlung*, Leipzig, 1874; Draper, *Hist. of the Intell. Develop. of Europe*, 1875, Vol. II., *p*·259; Whewell, 同16页注〔2〕Vol. I·, *p*·339.

〔2〕 达尔文的〔协会〕主席就职演说，*Report of British Association*, 1886, *p*·511·

〔3〕 A·De Morgan, *A Budget of Paradoxes*, Chicago, Vol·I., 1915, *pp*·82, 8:.

〔4〕 O·Lodge, *Pioneers of Science*, London, 1905, *p*.136.

作。米耳赋于假说以适当的地位。但是甚至他的方案也是不完整的。象培根一样，他低估了数学和精确度量的重要性。但是两位都不明确把数理物理学放到什么地位。两位都低估了科学想象的作用，它的重要性由丁铎尔，在更近的时候由卢瑟福非常强调地阐明了。

十七世纪

宗教改革的第一个影响是有利于德国科学的进展。但是，在三十年战争期间（1618—1648）及其以后，接着就发生了市民和宗教的斗争以及政治上支解为带有点专制的松散的同盟。其结果是科学在德国几乎灭绝。

在法国，亨利四世（Henry Ⅳ）登上帝位，颁布了南特布告（Edict of Nantes，1598），宗教斗争多少有点缓和；法国人的天才开始发挥出来。此时在德国凋谢了的科学花朵又在法国含苞欲放了。

在意大利，伽利略的命运给科学的热情泼了冷水，而在英国，宗教斗争决没有完全吸引人们的注意力，在吉尔伯特以后的时期是非凡的科学成就的时期。

在这一世纪我们将要注视如下这些人的科学工作：意大利的托里拆利，德国的盖里克，荷兰的惠更斯，法国的巴斯卡、马利奥特和笛卡儿，英国的波意耳、胡克、哈雷和牛顿。这是一个伟大的实验以及理论活动的时期。

力学

运动定律

如我们所已知的那样，伽利略在他的关于真空中抛物体路经的解释中，已成功地掌握了运动第一和第二定律。后来，笛卡儿撰写力学，但他很难超过伽利略。笛卡儿关于运动第一定律〔《哲

学原理》(Principia Philosophioe)1644]的叙述是一种形式上的改进，但他的第三定律本质上是错误的。伽利略没有完全理解物体在它们直接碰撞下的运动，笛卡儿却把它弄错了，而最初的正确的叙述是由雷恩、沃利斯和惠更斯作出的。现在这种形式的运动定律是牛顿在他的《原理》中最先给出的。

笛卡儿在几何学和哲学上的成就大大地超过了他自己在物理学上的那些成就。他是一个形而上学家，他从有限的实验或经验中自信地推导出大量的推论，在他的最后的结论和实际的事实之间，他不许可自己受到任何可能的不符的干扰。他对伽利略的劲头不足的方法不表示丝毫赞赏。[1]

笛卡儿说："他（伽利略）不考虑自然界的第一因，仅仅寻求几个特殊的结果的一些原因，因此，这样的建筑是没有基础的。""伽利略关于真空中落体的速度的说法是没有基础的；他曾讲过重力是什么；如果他知道重力的性质，那么他可能已知道在空虚空间中什么也没有。""在他的书中我没有看到我所羡慕的东西并且几乎没有看到我认为是他自己所贡献的东西。"[2]按照他自己的先验的原理，笛卡儿认为他可以容易地解释伽利略所作出的一切，实际上，笛卡儿没有真正的加速度概念，而且犯了伽利略避免了的错误。

笛卡儿派和莱布尼兹派之间的争论

笛卡儿学派和莱布尼兹学派之间就衡量运动物体的功效问题

[1] "在十七世纪初容易得到的一些力学真理，作为一个天才的人，伽利略掌握得尽可能多，而笛卡儿掌握得尽可能少。" Whewell. 同16页注[2] Vol.I., p.338.

[2] Descartes, *Lettres*, Vol.II., Paris, 1659. Lattar 91, p. 391; Dühring, *Krit.Geschichte d.allgem,Prince.d.Mechanik*, Leipzig, 1887, pp.106—108; Kästner, *Geschichte d.Mathematik*, Vol.IV., pp.22—26

发生了一场奇特的争论。笛卡儿认为功效正比于速度；莱布尼兹认为功效随速度的平方而变化。[1]这场争论持续了半个多世纪之久，直到达兰贝尔于1743年在他的《动力学》的序言中所作的评述，才结束了这场争论，虽然在这之前惠更斯关于这个问题的思想是十分清晰的。这么长时间的争论纯粹是一个字面之争；两者的观点都是对的。如果我们考虑时间的话，运动物体的功效是随它的速度而变的。以双倍的速度垂直向上抛出一个物体上升了两倍长的时间。如果我们考虑距离的话，这功效就随速度的平方而变化。以双倍的速度垂直向上抛出的一个物体上升了四倍那么远。对时间的这种考虑导致笛卡儿所说的“运动量”（我们称为“动量”）mv，并且使力的观念成为原始的概念。对距离的这种考虑导致了 fs 这种表示式，它使功成为原始的概念。前者的观点使 $ft = mv$ 成为基本方程；后者的观点使 $fs = mv^2/2$ 成了基本方程。按照笛卡儿的观点，功是一个推导出来的概念；按照莱布尼兹的观点，力是一种推导出来的观念。[2]为牛顿和现代初级教科书的作者所遵循的笛卡儿的观点，使力、质量、动量成为原始的观念；通常为惠更斯和蓬瑟勒学派所遵循的莱布尼兹的观点，使得功、质量、活力（能量）成为原始的观念。[3]如果某些

---

[1] *Acta Eraditorum*, 1686, “Demonstratio erroris memorabilis cartesii” ,etc.

[2] 法国人贝朗热在1817年提议将 ft 命名为**冲量**，麦克斯韦在他的《物质和运动》中以同样的意义用过这个词。莱布尼兹（1695年）称 mv^2 为活力（vis viva或living force）。科里奥利提议把 $\frac{1}{2}mv^2$ 称为活力，现在英国人称这一词为动能。科里奥利对 fs 用了功这个名称，并且蓬瑟勒继续保持了这种用法，他采用千克一米作为功的单位。科里奥利和蓬瑟勒是第一批提倡改革理论力学讲课的创始人中的两位。见E.Mach, *Science of Mechanics*(Ed.McCormack), *pp*.271,272; Marie, *Histoire d. Sciences Math.et Phys.*, Vol.XII., 1888, *pp*.191,192.

[3] E.Mach, 同上, *pp*.148,250, 270—276; H.Klein, *Principien der Mechanik*, Leipzig, 1872, *pp*.17,18.

现代思想家在肯定动能的客观实在性及否定力的客观实在性方面是正确的，那么莱布尼兹的方法似乎更有哲学性意义。[1]

60 重量和质量之间的区别

教师们会觉察到力学中的那些在科学进展中是难于攻克的部分，正是一个初学者通常发现是“难以学会”的那些部分。举例说：力和能之间的差别，或者质量的概念。早期的一些作者，诸如伽利略、笛卡儿、莱布尼兹、惠更斯，都没有明晰的质量概念；重量和质量可以更换使用；这些术语是同一个东西。当发现同一个物体在地球表面的不同地方可以得到不同的重力加速度时，这两个概念之间的真正差别就变得明显了。当里希尔在1671年从巴黎到法属圭亚那的卡宴（Cayenne）去做天文观察时，他发现了他的那个在巴黎时走得很准的摆钟，在卡宴每日慢两分半平均太阳时。摆被他缩短了，但是当他回到巴黎时发现这摆太短了。[2]敏锐的惠更斯立刻领悟到其原因，并且发现，部分的解释为在卡宴地方有更大的地球离心倾向。[3]牛顿在把他的动力学定律推广到天体时明确地认识到了。[4]在地球上的同一个地方，质量和重量彼此成比例。这不是一个不证自明的事实；牛顿在一系列重要的关于摆的测试中证明了它。“在以最大准确度做实验时，我总是发现了物体中的物质的量正比于它们的重量。”[5]

〔1〕 参阅P. G. Tait, *Recent Advances in Physical Science*, London, 1885, pp.16, 343—368。

〔2〕 Marie, 同59页注〔1〕Vol. V, 1884, p. 102.

〔3〕 惠更斯计算，离心作用使秒摆在极点比在赤道短1/289，在赤道的离心力是物体的绝对重量的1/289。见惠更斯，*Ursache d. Schwere*，由R. Mewes翻译，Berlin, 1896, p. 34.

〔4〕 E. Mach，同59页注〔2〕pp. 161, 251.

〔5〕 *Principia*, Book II., Prop. XXIV., Cor. 7

惠更斯在他的《论时辰仪的摆动》（巴黎，1673）中第一次提出了摆的数学理论，惠更斯的这本著作与牛顿的《原理》相比 61 是第二流的。这本书从对摆钟的叙述开始。他的一个关于悬挂点和振动中心的可互换性的新定理已经编进了初级教科书中。

笛卡儿的漩涡说

在开始讲牛顿发现引力定律之前，我们简单地回顾一下笛卡儿的漩涡说。在推翻了托勒密体系和否定了古代的晶体天球说以后，这个难题就摆在哲学家们的面前：是什么原因使得行星在它们的轨道上运动？在笛卡儿的理论中作出的解答被热切地接受了。[1]所有的空间都充满了流体或以太，它们的各个部分相互作用并产生圆运动。这样一来，这种流体形成了许多有不同大小、速度和密度的漩涡。在太阳周围有一个巨大的漩涡，它的回漩带动了地球和其它行星。较慢的并较少受到离心力作用的较密的物体被迫朝向太阳这个漩涡中心。每个行星都处在产生通常的重力现象的另一个漩涡中心。更小的漩涡使物体的各部分之间产生内聚力。图7是笛卡儿在他的《哲学原理》(1644年)中所画的漩涡图。

这个理论是有意义的，因为牛顿正是在这种信仰的基础上成长起来的；在英国和在欧洲各大学都讲授过这个理论。在1671年笛卡儿的信徒罗奥尔特写了他的《物理学概论》，这本书在法国成为经典性教科书，并在英国和美洲讲授过。塞缪尔·克拉克的拉丁文译本，在伦敦于1697、1703和1710年出版过。克拉克的 62 英译本晚到1730年即牛顿死后三年还出版过。1710年和1730年的

---

〔1〕 有趣的事实是，笛卡儿以他的理论首先企图调和哥白尼的学说和地球静止的教义。他讲道："地球在它的天空中是静止的，但这个天空没有阻碍它随同天一道运转，而且所有的行星也是一样。"

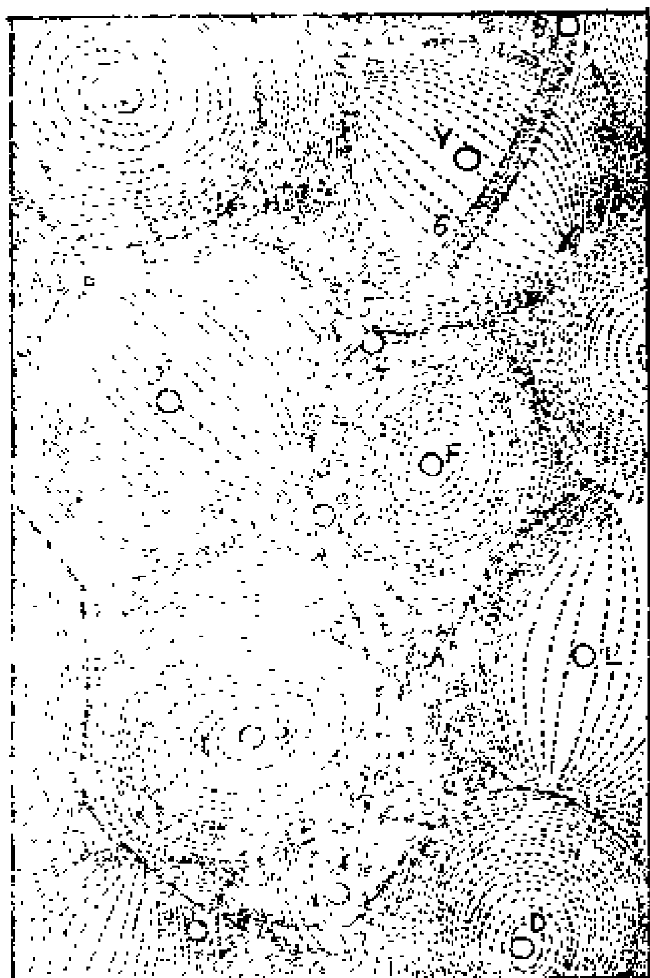


图 7

版本（除1697年版外）还有克拉克的旨在揭露笛卡儿体系的谬误的关于原书的注释。这些注释之一是从牛顿的《原理》中选出的反驳漩涡说的一长段引文。那时，在英国的大学中的一些学院教师并没有学过牛顿的科学，都是笛卡儿教义的信徒。克拉克的译本是流行的，因为它既可以为笛卡儿的信徒又可以为牛顿的信徒所接受。两方面都公平地讲述，每一个讲师都可以取其所需。耶鲁大学迟到1743年还在用这本书。[1]在法国，直到十八世纪中期，牛顿的学说才完全排除了对笛卡儿漩涡说的信念。[2]

63

---

〔1〕 *Teaching and History of Mathematics in the U.S.*, Washington, 1890, p.30.

〔2〕 在1727年访问过英国并在以后成为牛顿哲学的忠实支持者伏尔泰(Voltaire)说："一个到达伦敦的法国人发现了在哲学上象在其它方面一样的很大的变化。他曾经感觉到的充实的世界在这里是空空的。在巴黎，你看到宇宙是由稀薄物质的漩涡构成的，在伦敦我们什么也没看到。"见，Whewell，同16页注〔2〕，Vol.Ⅰ., P.431。我们不能责怪欧洲人不相信"空虚"的空间。在这方面，牛顿本人不属于牛顿学派。见*Correspondence of R.Bentley*, Vol.Ⅰ, p.70; *Proc.Roy.Soc.of London*, Vol.54., 1893, p.381

笛卡儿漩涡说很难和伟大的科学理论、如托勒密体系或哥白尼体系或光的发射说相并列。笛卡儿没有试图把它的理论跟开普勒定律相调和；事实上，它没有满意地解释一个简单的现象。它也没有导致新真理的发现。但是，它把行星的运动归结为力学的原因。它具有哲学的重要意义，因为它试图根据力学而不是以泛灵论观念来解释宇宙。它的一般特征是很容易被掌握的，人们的思想中立刻就能想到一幅旋风或水的涡流的图象。因此，这些漩涡也有助于推翻亚里士多德的体系。[1]

牛顿的青年时代

牛顿（1642—1727）出生在林肯郡的伍尔索普（Woolsthorpe），他的诞生和伽利略的死是在同一年。在他十二岁时他的母亲送他到格兰撒姆（Grantham）公立学校读书，在这学校里，他开始表现出对机械发明有明显的兴趣。他造了一架水钟、一个风磨、由坐在里面的人驱动的车子和其它玩具。在1660年，他进入剑桥大学三一学院念书。剑桥是牛顿天才的诞生地。当他是一个大学生时，他读过的一些物理学著作中有开普勒的《光学》，巴罗的《讲义》。在那时候，他已经想到他的一些最伟大的发现的初步观念。在1664年他做了一些关于晕圈的观察。[2]

64

万有引力的初步思想

牛顿在1666年说：“我开始想到把重力推广到月球的轨道

〔1〕 John Playfair, “Dissertation Fourth”, 在*Encylop. Brit.*, 8th ed., Vol.I., *pp*.609,601; O.Lodge, *Pioneers of Science*, , *pp*.152—156.
〔2〕 Newton, *Opticks*, London, 1704, Book Ⅱ., Part Ⅳ, obs. 13, *p*.111.

上，……因而把维持月球在它的轨道上所需要的力和地球表面的重力作了比较。”[1]

上述关于万有引力的想法出现在他脑子中时，他正在林肯郡的家里，他在家里躲避那时正在剑桥流行的瘟疫。彭伯顿作了如下详细的叙述：“当他独自坐在花园里时，他沉浸在关于重力的思考之中；他发现这重力从地球的中心到我们所能上升到的最远距离都不会明显的减弱，不管是最高的楼顶，甚至不管是高山岭的顶峰，也没有明显的减弱；在他看来，有理由作出这个结论：即这力必定延伸到比我们通常所想象的距离还要远；他自言自语道：为什么不能高达月球呢？如果是这样，月球的运动肯定受到重力的影响；或许它因此有可能保持在它的轨道上。”[2]正如牛顿所猜想的，也如胡克、惠更斯、哈雷、雷恩和其它人所猜想到的一样，即，如果开普勒第三定律（行星运转的时间的平方正比于它们和太阳之间的距离的立方）是正确的，那么，地球和太阳系的其它行星〔与太阳〕之间的吸引力反比于距离的平方。开普勒第三定律的准确性在那时是受到怀疑的。证明上述猜想正是需要牛顿的天才。

65 牛顿推迟20年发表他的万有引力定律的原因

牛顿的第一次关于万有引力的研究是在1665或1666年作的，

---

〔1〕 *Portsmouth Collection*. Sect. I., Division XI., No. 41; W. W. R. Ball, *An Essay on Newton's "Principia"*, London, 1893, p. 7.

〔2〕 Pemberton, *View of Sir Isaac Newton's Philosophy*, London, 1728; W. W. R. Ball, 同上, *p*. 9; 牛顿因苹果落地而提出万有引力的思想，这个闻名的轶事被某些人认为是荒唐无稽的，但鲍耳(W. W. R. Ball)为这个轶事作辩护，并且给出了与此有关的许多权威性证据。*pp*. 11, 12.

但奇怪的是，直到约20年以后他才发表他的引力定律。有两种关于牛顿将发表推迟20年之久的解释。[1]关于这个发现的老的解释主要是根据彭伯顿的权威性证据，他知道牛顿的晚年生活。按照彭伯顿的说法，牛顿在1666年根据他对地球半径的估计，即假定纬度一度是60哩，“这个一般的估计是在地理学家和海员中间使用的”，但真实的值是“约$69^1/_2$哩”。结果，牛顿的“计算不符合预期值”，并且“他那时停止了对这问题的任何更深入的思考。”约1684年他得到了让·皮卡特关于子午线弧度的更精确的测量，并且能够证明平方反比定律。这是彭伯顿的简短的叙述。后来，这传说变成这样：牛顿在以新数据进行计算时是如此激动，以致于他不能算下去，不得不依靠一个朋友的帮助。这个故事第一次出现在于1804年出版的罗比森的《力学的哲学》第288页中。诺伊斯在他的《天空观察者》一书中以诗的形式很美妙地描述了这件事。

天文学家J·C·亚丹斯和数学家格莱舍尔在1887年提出了第二种解释，那是在牛顿的《原理》发表200周年纪念日时候提出来的。他们能引证牛顿的科学发现的早期历史的手稿，这是在关于牛顿手稿的“朴次茅斯收藏”（Portsmouth Collection）中发现的。这手稿包含了牛顿在1666年关于比较重力加速度的理论值和实验值的叙述，“并发现它们的答案相当近似”。[2]牛顿自己写下来的这句话，跟彭伯顿根据听说的证据作出的论断是相矛盾的。而且，彭伯顿的“纬度一度为$69^1/_2$哩”表明他用的是每哩为5280呎的“英国法定哩”。但最近证明，十七世纪的英国海员，在1666年以前，不是以60英国法定哩算作纬度一度，而是以每哩只有5000呎的60哩算作纬度一度。如果牛顿用的是60个这么短的哩，他的计算跟实验值就会有18%的误差，因此，牛顿就

66

〔1〕详见 *Sir Isaac Newton* 1727—1927，Baltimore，1928，pp. 127—128.

〔2〕W.W.R.Ball，同64页注〔2〕

不可能“发现它们的答案相当近似”。牛顿在1666年或在那时以后不久，不能得到关于地球大小的相当准确的数值是难以相信的。诺伍德关于纬度一度的仔细测量发表在他的1636年的《海员实践》上，他给出纬度一度为$69^1/_2$英国法定哩，稍微高于后来让·皮卡特的69.1哩的值，并且诺伍德图在1666年以前在许多英国出版物上引用过。斯涅耳1617年的测量为$66^2/_3$英国法定哩，这个精确的结果被冈特应用在他的《函数尺和直角仪的说明》书中，这本书正是牛顿在1666年买到的那本“冈特的书和函数尺”。[1]斯涅耳的值被引用到瓦伦尼乌斯的《地理学》中，牛顿自己在1672年置备了该书的一种版本。然而，牛顿多年来没有公布自己的引力定律。为什么会有这种推迟呢？

正如亚丹斯在1887年所指出的那样，对牛顿在他的《原理》发表之前的那几年期间的通信的考察表明，牛顿的困难具有另一种性质，即数据的验证在1666年已相当完美了（正如牛顿自己的叙述所表明的那样），但是牛顿还未能决定球形物体对球外某点的吸引是怎样的。他给哈雷的信表明，他尚未料想到地球的吸引恰如它的质量全部集中在中心点一样。因此，他不能断言，假定的引力定律会被各种数据所证实，虽然当距离很大时，他可以主张它会得出接近的近似值。当哈雷在1684年访问牛顿时，他请牛顿决定，如果引力定律是平方反比律的话，行星的轨道是什么。牛顿在1679年为胡克解决了类似的问题，因此，他立刻回答哈雷，它是一个椭圆。牛顿重新开始研究万有引力，并在1685年能够通过解决那种长时间来使他困惑的问题而完成了他的发现。他证明了，在任何一点的球体的密度仅仅取决于它和中心点的距离，这球体对外部质点的吸引恰如球体的质量全部集中在中心点一样。[2]这样一来，他证明了两个球体之间的吸引力和假定每一

67

〔1〕 见D.Brewster 的*Memoirs of Sir Isaac Nowton*. Edinburgh, 1860, Vol. I., Chap II, *pp*.27—29,

个球的质量都集中在各自的中心点是相同的。格莱舍尔说：“牛顿一经证明了这个精妙的定理——从牛顿自己的话中，我们知道，在他没有用数学证明这个定律之前，他丝毫没有料到这样美妙的结果——宇宙的全部机制就立刻展现在他的面前。”

关于牛顿推迟发表万力定律的两种解释，彭伯顿的那种解释由于跟牛顿本人的叙述以及跟海员们的实践相矛盾而必须被否定。第二种解释是根据牛顿的论文和通信这些事实作出来的，虽然在一些方面看来尚未完全说明他的伟大发现的进程，但它构成了一种前后一贯的解释。

关于牛顿引力定律的地月验证

68

我们以图8开始阐明牛顿在他的《原理》一书的第三卷第四个命题中所作的关于平方反比定律的验证。大地测量得出了地球的圆周长是123，249，600巴黎尺，月地之间的平均距离约为地球半径的60倍。因此，假定月球轨道是圆形的，则其轨道为123，249，600×60＝7，394，960，000 巴黎尺月球围绕地球转动一周为27天7小时43分，或为39，343分。因此，它的轨道速度是

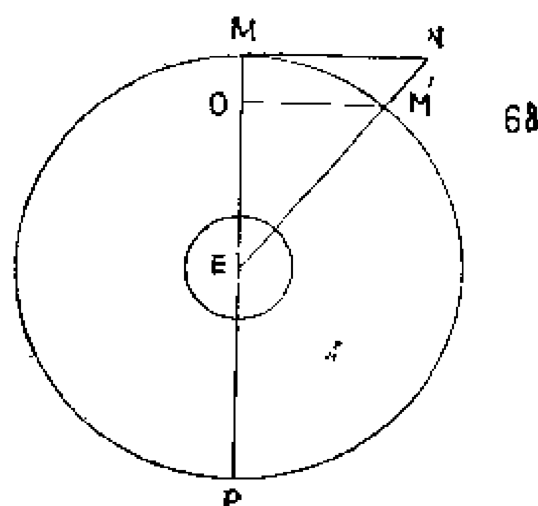


图 8

---

〔2〕 参阅 *Principia* 一书中诸定理，见该书，Book I.，Sec.XII.，也见 Book III.，Prop. VIII；关于万有引力定律发现的细节，参阅W.W.R.Ball，见64页注〔2〕；J.W.L. Glaisher "Bicentenary Address"，*Cambridge Chronicle*，April20，1888.我们还引用了Ball，*Hist.of Math.*，1888，*pp*.295—297. Rosenberger's *Isaac Newton und Seine Physikalischen Principia* 是值得参考的，虽然作者没有用《朴次茅斯收藏》中的任何资料。

7,394,960,000 ÷ 39,343 = 187,961.67（巴黎尺/分）。令弧MM′表示这个速度，其中M是月球在它的轨道上位置，正是地球的中心。那么，在一个很小的角度MEM′下，显然，MM′近似地等于MO，NM′表示月球每分钟朝向地球所落下的距离。因此，

$\overline{MM'}^2 = MP \cdot MO$（第一卷第四命题补充9）

我们得到

$$Mo = \overline{MM'}^2 \div MP \cong 15\frac{1}{12}(\text{呎/分})。$$

因为ME等于60个地球的半径，依据平方反比定律，物体每分钟向地面落下的距离为$60^2 \times 15\frac{1}{12}$呎/分或为15½呎/秒。更准确地说是"15呎1吋又$1\frac{4}{9}$吩"①。既然，惠更斯所做的单摆实验得出在巴黎一个物体从静止落下时每秒钟所通过的距离是"15呎1吋又$1\frac{7}{9}$吩"（第三卷第四命题）。因此，平方反比定律被证明是正确的。

在第一卷第四命题的注解中牛顿表示了他对惠更斯的感谢，因为在上述计算中应用了离心定律。

69 当牛顿把他的《原理》送到皇家学会时，胡克(1635—1703)声称平方反比定律是他发现的。牛顿的答覆写在他给哈雷的一封信中。[1]《原理》是在哈雷的指导下并以哈雷的经费在1687年发表的。

虽然在三个多世纪以前人们就知道这个定律表达了重力吸引的强度的变化，虽然科学上的发现自那时起比以前任何时候都要

① 1吩为$\frac{1}{12}$吋——译者注

〔1〕详见，W.W.R.Ball，同64页注〔1〕，p·155。

快，但是我们一直不能解释石头落地的原因。在科学进程中，这的确是稀罕的事。地球和月球通过空虚空间相互作用而不需要它们之间或它们周围的某种介质的帮助，现代物理学家认为是难以相信的。至于牛顿关于这个问题的观点对于这个问题不是没有意义的。牛顿相信“超距作用”吗?或者他相信物质能作用在没有物质的地方的这样一种观念吗？在一封给本特利的信中，他写道：

“就物质来说，重力应当是生来就有的、固有的和必不可少的，因此，一个物体可以通过真空超距地作用在另一个物体上而不需要任何其它的介质，它们的作用和力可以通过真空从一个物体传递到另一个物体，这种观点在我看来是这样大的荒谬，以致我认为没有一个在哲学上有足够思考力的人会同意这种观点。”[1]

但是牛顿常常被强加了相反的信仰。超距作用这学说的作者不是牛顿，而是科茨（1682—1716），他在1713年编辑了《原理》的第二版，并在他的序言中宣扬了这个学说。当后来牛顿学派的哲学在欧洲赢得地位时，流行一时的观点与其说是牛顿的意见还不如说是科茨的意见。[2]

液体和气体

70

在讲到液体和气体的力学的时候，我们从巴斯卡（1623—1662）关于液压的研究开始，巴斯卡受到人们的赞美不仅因为它是一个早熟的数学家和《与乡人之书》（Provincial Latters）的作者，而且因为他又是一个物理学家。他出生在奥弗涅的克莱蒙。在他的于1653年写成并于1663年、即他死后一年第一次出版的简短的《论液体的平衡》一文中，[3]他阐明了闻名的“巴斯卡定律”，即施加给液体的压力不减弱地穿透到各个方向，并以相同的力作用在和力成直角方向的所有相等的表面上。他以和我们现代实验室中使用马森(Masson)仪器进行的相同实验证明了，依靠液体重力得到的正对表面的压力仅仅决定于液体的深度。几

[1] *Corresp .of R.Bentley*, Vol.I., *p*·70; *Proc.of Royal Soc. of London*, Vol 54,1893, *p*·381·为了别的方便，牛顿赞成以太的假设，见他的*OPticks*, Queries 18,22;也见*Phil.Trans. Abr.*, Vol.I., *p*· 145,No·, 1672; Birch, *Hist.of Royal Society*, Vol, Ⅲ., *p*.249,1675,

[2] 见麦克斯韦"论超距作用"的讲演，*Nature*, Vol.Ⅶ., 1872—1873, *p*·325。科茨的序言载于由W. 汤姆逊和 H. 布莱克本于1871年在格拉斯哥再版的牛顿的《原理》中。我们没有能力解释重力，不是由于没有尝试过。惠更斯在他的《论压力的起因》(Discours sur la Cause de la Pésanteur)中在这方面做了第一次重大的努力，这本书的一部分是在1687年牛顿的《原理》发表以后写成的。《论压力的起因》的德文译本是由R.Mewes于1896年在柏林翻译出版。机械的引力理论是由1724年出生在日内瓦的勒·塞奇提出的。见Le Sage, "Lucréce Newtonien," *Mémoires de l'Acadêmie des Sciences*, Berlin, 1782, pp. 404—432.他讲授道，重力是由来自空间各个方向的原子流引起的。以后关于重力的原因的猜想是由麦克斯韦、开尔芬勋爵、艾森克拉赫(C.Isankrahe)，黎曼(Bernard Riemann),欧拉、德林斯豪森(Niv.Dellingshausen)．普雷斯顿(Tolver Preston)、里森纳克(Adalbert Rysáneck)．杜·博伊斯—赖蒙德 (Paul du Bois-Reymond)，瓦希(Vaschy),施拉姆(Schramm)、安德森(Anderson)、莫莱尔(Möller)和其他人提出的。对这个问题的批判性的历史概述，见艾森克拉赫,"Ueber die Zurückführung der Schwere auf Absorption"in ***Zeitsch.f. Math.and Physik***, 1892, Suppl., *pp*. 163—204; 普雷斯顿，"Comparative Review of Some Dynamical Theories of Gfavitation, " ***Philosophical Magazine***, (5)Vol.39, 1895, *pp*·145 et Seq.,; 泰勒 (W.B. Taylor), "Kinetic Theories of Gravitation," ***Smithsonian Report***, 1876, *pp*·205—282. 我们将在后面讲到涉及相对论的讨论。

[3] *OEuvres Complètes de Blaise Pascal*, Parts,1866, Vol.Ⅲ. pp.83—98.

个具有相等面积的可动底的不同形状的容器一个接一个地挂在天平的一臂。这些容器注水到这样高，使其压力正好能压下容器底、并在天平的另一臂举起一个重物。巴斯卡还以两个滑动塞或活塞对着一个闭合容器的流体挤压，第一个塞子的表面大于另一个塞子表面一百倍；作用在第一个塞子上的一个人的力将和作用在另一个塞子上的一百个人的力平衡。“由此，可见一个盛满水的容器是为把力增加到我们所选择的任何程度的一种新的力学本原和一种新的机械。”[1]

“厌恶真空”

除了望远镜以外，在十七世纪没有其他的科学发现会比气压计和空气泵的实验更加令人惊奇。在亚里士多德和柏拉图的著作中已经发现偶尔有空气有重量的说法，但是直到伽利略和托里拆利以前人们都不知道有虚无。不少人沉溺于关于真空的许多含糊的思辨。亚里士多德认为，真空并不存在，一直到笛卡儿的著作仍持相同的观点。两千年来哲学家们都讲过自然界厌恶空虚空间，——厌恶真空——好象无生命的物体能够有感觉似的。由于这种厌恶，据说自然界以容纳附近的任何东西并以这种东西立刻填满任何被弄空了的空间来阻止真空的形成。甚至伽利略也不能使自己完全摆脱这种非哲学的学说。当他听到以一个刚造成的有很长的吸气筒构成的抽水唧筒不能使水升高到超过约33呎时，他感到惊讶。他评述道，厌恶真空是一种有其局限的并能被量度出来的力。他以平常压力下的空气和在高压下的空气注满玻璃容

[1] *OEuvres Complétes de Blais Pascal*, Paris, 1866, Vol. Ⅲ., p. 85.

器后的重量差使自己相信空气有重量。[1]他估计，空气的密度小于水的1/400。

这样，伽利略知道：（1） 空气有重量；他还知道（2） “对真空的阻力”是以水柱的高度来量度的，而且也是以对抗活塞的重量来测定的。但这两个概念在他的心中是分开的。[2]这尚待他的学生托里拆利来改变实验，来统一和结合这两个观念，并且把空气列入可以施加压力的流体名单之中。

托里拆利实验

托里拆利（1608—1647）在耶稣会学校开始他的数学研究，并在罗马的卡斯特里指导下继续研究。他精通伽利略的著作，并发表了一些论力学的文章。伽利略渴望认识这些论文的作者，并催促托里拆利到佛罗伦萨跟他合作。托里拆利接受了这个邀请，据说，他的交往和谈话极大地安慰了这个盲人物理学家的暮年。三个月后，伽利略逝世。伽利略的保护人托斯卡纳的大公爵让托里拆利以学院数学教授的名义作为伽利略的继承人。

托里拆利设计了以垂直的水银柱测定真空阻力的方案，他预料水银柱的长约相当于水柱的1/14。“托里拆利实验”是在1643年由**维维安尼**（1622—1703）在佛罗伦萨进行的，维维安尼17岁时就成为伽利略的学生，而后在托里拆利指导下进行研究。

托里拆利从未发表过一篇关于他的这项研究的说明。他在这时太深入地集中注意力于摆线的数学研究，而在几年以后他也逝世了。可是，他在1644年给他在罗马的朋友M. A. 里奇的两封信

---

〔1〕 伽利略的*Dialogues Concerning Two New Science*，由克鲁(H. Crew)和萨尔维奥(A. de Salvio)翻译，New york，1914，*pp*. 78. 79. 也见马赫，同59页注〔1〕 *pp*. 112—114.

〔2〕 Mach, in *Monist*, Vol. 6, 1896, *p*. 170.

中描述了他的实验，这两封信尚未佚失。[1]他说，他的研究目的“不是单纯地产生真空，而是要制造一种仪器，用它来证明空气的变异，时而较重和稠密，时而较轻和稀薄。”[2]

里奇在1644年给巴黎的默森的一封信中描述了托里拆利的实验，默森以他的广泛的通信联系在科学界起着中间人的作用。〔关于托里拆利实验〕的新闻在法国学者中间引起了大轰动。但是这个实验直到1646年夏天才在法国被重复（跟巴斯卡有联系的鲁昂的皮埃尔·珀蒂曾作过这个实验），因为在那时以前没有适当的可利用的玻璃管。

传到巴斯卡那里的关于意大利人的实验的说明一定是很不完全的，因为他发现了，有必要独立地思考现象。他作出结论说：“真空在自然界不是不可能的，自然界不是象许多人的想象那样以如此巨大的厌恶来避开真空。”[3]

巴斯卡推论，如果水银柱是单纯地被空气压力提起的话，那么水银柱在海拔较高的地方应当更短。他在巴黎的教堂尖顶做了实验，但他希望得到更肯定的结果，因此，他写信给他的内兄，要他在奥弗涅（Auvergne）的多姆山（Puy de Dôme）做一次实验。〔实验的结果是〕水银柱高度有三英寸之差，“这使我们以赞赏和惊奇的心情而狂喜。”巴斯卡重复了托里拆利的实验，

---

〔1〕 这两封信第一次出版于1663年，见最近由赫尔曼再版的 *Neudrucke*, No.7.

〔2〕 他在这封信的末尾写道：“因此，我的主要问题不是同时成功的，……因为〔装有水银〕的容器由于另一种我从未考虑过的原因，即由于热和冷而发生了变化，而且这种变化非常明显。”但只有从阿蒙顿时候（1704年）起人们才考虑到需要对温度作修正。见G.Hellmann，同上，pp.16(3)

〔3〕 Nouvelles expériences touchant le vide, *OEuvres Compl. de B.Pascal*, Paris, 1866, Vol, Ⅲ., p.1.也见他的 *Traité de la pesanteur de la masse de l'air*, pp.98—129.

用的是红葡萄酒和一根46呎长的玻璃管（显然，此时玻璃管已经很普遍）。他用弯管做了实验，并解释了他的理论。一个注有一半空气的气球，当把它拿到山顶时，发现他膨胀了，而在下山时，它又慢慢地恢复了原样。

74 盖里克关于空气压力的实验

由于在意大利和法国的实验研究，“厌恶真空”的学说已被推翻。在德国发生了重复的过程。德国研究者的早期工作是独立进行的。盖里克（1602—1686）出生在马德堡（Magdeburg）的名门望族。他在德国的几个大学、也在莱顿的大学学习过，以后又在英国和法国旅行。在三十年战争中，马德堡在1631年被蹂躏，盖里克和他的一家好容易才活着逃脱。后来他作为工程师在阿多尔法斯（Gustavus Adolphus）的军队中谋生。1646年他当上了马德堡市的市长。

关于真空问题的争论引起了他寻求实验事实的好奇心。他说：“雄辩术、优雅的语言或争论的技巧，在自然科学的领域中是没有用处的。”在1663年他完成了他的著作《论真空》的手稿，但直到1672年才出版。[1]

盖里克起初用一个密封的装满水的葡萄酒桶，试着用适当的黄铜泵把水抽到下面的桶里。但是把黄铜泵固定在桶上的带子和铁螺丝失去了控制。在把黄铜泵系得较为牢固以后，三个壮汉拉动〔泵的〕活塞，终于成功地把水抽出。随即听到一些噪音，似乎

〔1〕 这本著作包括七卷本书，其中第三卷包含了他自己的实验，并于最近被译成德文，载于奥斯特瓦尔德的 *Klassiker*, No. 59。盖里克的空气泵和实验的最初说明被K·朔特(Kaspar Schott)发表在他的 *Mechanica hydraulico—pneumatica*, 1657，和在他的 *Technica Curiosa*, 1664。由于1657年该书的出版，波意耳才知道盖里克的实验。

桶内剩余的水在剧烈地沸腾，这种情况一直持续到空气取代了被抽出来的水时为止。

后来，盖里克以铜制球形容器代替这种有漏孔的木桶，象前面一样，把水和空气都抽出来。开始时活塞很容易被移动，而以后要有两个人的气力才能勉强拉动活塞，当“突然出现大霹雳声并使大家都感到惊吓”时，铜球塌瘪了。以后，一个更大的和更严实的球形金属容器（图 9 ）被安装固定并被抽空。“当打开活



图 9

塞时，空气以这样大的力挤进铜球内，恰似它要把附近的一个人拉到铜球里一样。虽然你在一段相当的距离内捂住你的脸，但你的呼气被吸走了。的确，当你用手抓住活塞时不能不冒着被猛然拉下的危险。

接着，盖里克发明了抽气泵，它的最初形式就象图10所示的一样。它的带有龙头的活塞是可以拆开的，因此作实验的对象可

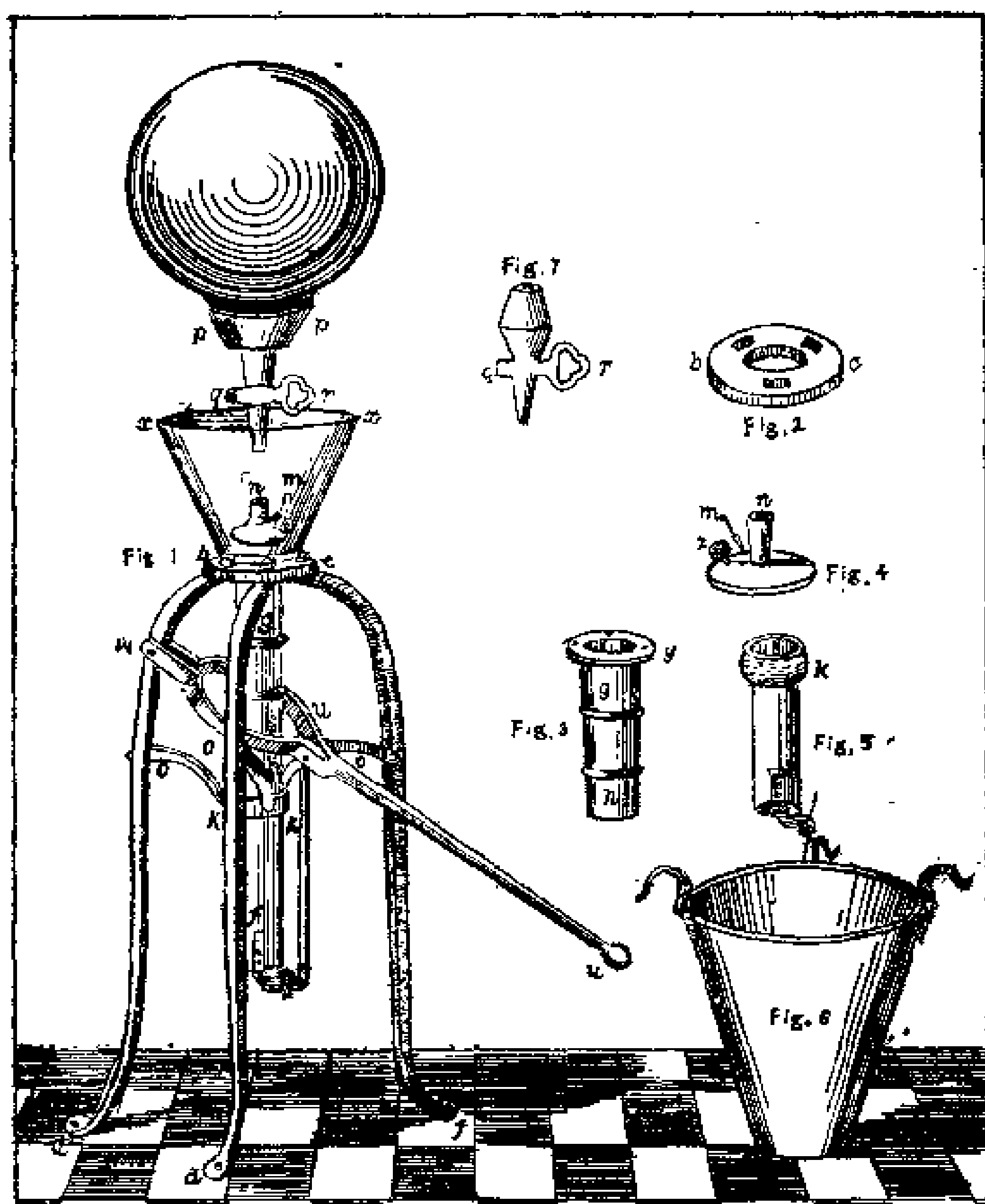


图 10

以放进容器里。为了特别注意防止漏气，活塞固定在注入圆锥形容器的水的下面，人们用这个泵做了许多实验。放在真空中的钟人们听不到它的响声；在里面的火焰熄灭了；在里面的鸟张开大嘴拼命吸气，而最后死去；鱼也死在里面；葡萄在真空中能保存六个月。和上面抽空的玻璃球相接并一头浸在下面水中的长管就是盖里克的水式气压计。他以空气的压力来解释管子里水的上

升。他观察到水柱高度的起伏，并用这个仪器作天气预测。一个浮在水上的小木头人在管子里面上下运动，并以他的手指指出了各个时刻的空气压力。盖里克称量容器的实验，即先是当容器充满空气时秤量一下，然后抽空了再秤，这个实验已放进初级教科书中。他的“马德堡半球”同样是真实的。他做了一对直径约1.2呎的半球，并于1654年在雷根斯堡（Regensburg）表演给帝国国会和皇帝斐迪南三世(Emperor FerdinandⅢ)观看。根据他的计算，要克服大气压力把这两个合在一起的半球打开，需要有2686磅的力。他们用了16匹马才把它拉开，每个半球八匹马。他的著作有大量插图，朴实地说明了实验是怎样做的。

在那时期，盖里克做了其它的实验，他偶然断言，如果你进入到一个大的抽了气的容器里去呼气，你将在那片刻作你最后的一次呼吸。因为人们怀疑事情是否真是这样，所以他用一个新的实验来说明这种“抽”力。在一个大泵的圆筒里，同一根绳子拴住其活塞，让这绳索绕过一个滑轮，并把绳子分成许多分支，有二、三十人可以拉这根绳子。一但这圆筒跟抽空的容器连接时，活塞就立刻被大气压力推下，同时，拉着绳子的人也被拉向前去。

正是这个时候，盖里克第一次听到托里拆利早在十一年前已做了这些实验。[1]

波意耳的生平

在英国，**波意耳**（1627—1691）首先研究了空气的力学。他出生在爱尔兰的利斯莫尔城堡（Lismore Castle）。在他的自

---

〔1〕 盖里克的一对“马德堡半球”于1893年在芝加哥哥伦比亚博览会上展出。至于盖里克的原始气泵的命运，参阅 G.Berthold. *Wiedem.Annalen*, Neue Folge, 54, 1895, *pp*.724—726，据说，盖里克为这套装置花费了20,000塔勒。

 传中，他讲道："他认识一些和他同年的孩子，他长时间仿效了谁的口吃的习惯，以致最后他也有了这种毛病"；"我们以极大的勤奋做了"种种矫正，"但没有任何结果"[1]。在伊顿学院度过了近四年时间以后，他于1638年到了欧洲大陆。在日内瓦，有一天晚上下了一场可怕的雷雨，这使他害怕天罚的日子就在眼前。这时他变得相信宗教了，并且他以后的许多作品都是有关神学的。在1644年他回到家乡时，是一个18岁的年轻人，他发现自己的国家处在大混乱之中；从1645年伦敦的哲学会议以后，他得到了对科学研究的强大动力，波意耳把这个哲学会称之为无形学院，在〔1660年查理二世〕王政复辟以后，它被并入皇家学会。1654年他在牛津就职，他在那里建立了一个实验室，保持有几个实验人员在工作，并且聘请胡克作为他的化学助手。[2]在读到盖里克的空气泵的报道以后，他让胡克做了一个稍微精致的气泵，这是在1659年完成的。早在1660年波意耳就发表了他的《关于空气弹力……的新实验》。

在1668年他离开牛津到了伦敦。四十年来他的身体很虚弱。他的记忆力是这样不可靠，以致于他经常想放弃研究，然而他是一个多产的作家，并在国内外都有很大的声誉。在1657年以前，他有意识地不让自己去"认真地和系统地"阅读伽桑狄、笛卡儿或弗兰西斯·培根的著作，"在我花费一些时间来试验事物本身倾向我去思考什么之前，我不可以预先掌握任何理论或原理。"[3]

波意耳把气压计放进抽气泵的接收器中，并观察了在排气时加热液体的沸腾和水的结冰现象。

---

〔1〕 *The Works of the Honourable Robert Boyle*，五卷本，该书将作者的生平附在前面，由Thomas Birch 编辑，London, 1743, Vol.1.,（传记的）第6页。

〔2〕 见"Boyle, Robert"一文，在*Dic. of Nat. Biog.*。

〔3〕 *Works*, Vol.I., *p*.194.

如果不是一个自称的物理学家的荒谬批评，波意耳或许永远也不会发现以他的名字命名的定律。荷兰勒蒂赫（Lüttich）的教授F·利尼斯读过了波意耳的《新实验》，宣称空气要做到和29吋的水银柱相平衡的这种大事，那是非常不够的；他声称，他发现了水银被不可见的线（纤维）吊在管子的上端，并当他用他的手指头按紧管子的上端时就感到有这种线。这个批评促使波意耳重新作研究。“我们现在应当尽量以有目的地做的实验来表明，空气的弹力比我们必须归因于它去解释托里拆利实验现象的力要大得多。”[1]“我们那时取一根长的玻璃管，用灵巧的手和灯火把它的下端弯成这样形式，即，使其弯曲向上的部分几乎和管子的其余部分相平行，并且使这较短的一段玻璃管上的口……密封，把它的长度用直纸条分成若干吋（每一吋分成八等份），刻有这些分格的纸顺着它仔细地贴满。”类似的纸条贴在玻璃管的较长的一端。这样，“注入管子的弓形或弯曲部分适当的水银”，以便水银在管子两端达到相同高度。“这样做以后，我们开始把水银灌进管子的较长的一端……，直到管子的较短一端里的空气受到压缩后减小到它所占居的空间的一半……，我们的双眼注视着玻璃管的较长的一端……，我们高兴和满意地看到，玻璃管的较长部分的水银比另一部分高出29吋。”这玻璃管偶然被打碎了，后来准备了一支新的约8呎长的管子。这根玻璃管在他的室内用太长了，因此，他将它放在“一段楼梯”上，并用绳把它吊起来，“使它刚刚碰上”放在下面的“箱子”。也得到了小于一个大气压的压力。虽然，他使密封空气的压力从$1\frac{3}{8}$吋到$117\frac{9}{16}$吋高的水银柱之间变化，从一个极端到另一个极端约40个步骤， 80

[1] 见“Defence against Linus”，1662，*Works*，Vol，I.，p.100.

并且每一次都把观察值跟“按照设想，压力和膨胀成反比的假设”所应有的那些值作比较。观察值和理论值符合得相当好。

在1666年波意耳发表了他的“流体静力学佯谬”，他在这里尽力地驳斥了关于轻的液体对重的液体不产生压力的老学说。这样的驳斥在这么晚的时候出现似乎是必然的，这一点表明，流体压力的正确观念是慢慢地被吸收的。

在波意耳发表他的定律以后14年，“波意耳定律”又被杰出的法国物理学家**马里奥特**（1620—1684）独立地发现。在法国经常称它为“马里奥特定律”。马里奥特在他的1676年的一篇论文《论空气的性质》中公布了它。他说：“我们用一根40吋的玻璃管，我把它灌进$27\frac{1}{2}$吋的水银，留有$12\frac{1}{2}$吋的空气，把它浸入水银容器里1吋，露出在水银面上39吋，则得到14吋的水银柱和膨胀了一倍体积的25吋的空气。”根据重复的实验“就有充分的证据表明，人们可以把空气的压缩正比于它所负荷的重量作为一个确定的自然法则或定律。”他比波意耳更清楚地认识到这个定律的重要性。

在法国，实验物理学的复兴被归功于马里奥特。正如波意耳是伦敦皇家学会杰出的组织者一样，马里奥特是在1666年建立的法国科学院的第一批起领导作用的成员之一。马里奥特除了在很深的地下室仔细地测量了水银柱的高度以外，以后又在一个新建的位于巴黎高地上的天文台上作了测量，他得到一个用气压计估计高度的近似公式。他写了一篇论撞击的重要文章。

在1674年**巴本**（1647—1714）描述了一种气泵，在其中，象盖里克和波意耳所用过的那种带有活塞的长颈瓶容器，被代之以一块板和钟状玻璃容器。人们通常把这重大改进的荣誉给予巴本，但他自己把它归功于惠更斯。现在知道，惠更斯在1661年做了这种吸引人的革新，[1]巴本是惠更斯的学生和助手。

---

[1] E·Gerland, *Wiedemann's Annalen*, Vol. II., 1878, p·666.

抛物体的运动

在研究落体和抛物体运动时空气的阻力总是把这种现象复杂化了，它常常使研究者感到为难，并经常提供带有各种反对意见的批评。伽利略允许空气阻力的存在。约1670年马里奥特从巴黎天文台的实验中作出判定：落体所受到的阻力正比于时间的平方。牛顿倾向于同样的结论，而拉·希里倾向于时间的立方，

牛顿在1679年评论说“由于地球的周日运动，落体应当偏东而不会象通俗的观点所认为的那样是偏西。”我们可以在这里说，在法国，默森和皮埃尔·珀蒂预料那垂直向上的子弹会落在远远偏西的地上。[1]但是，他们不能找到这些子弹！于是人们去请教那时的法国哲人笛卡儿，笛卡儿严肃地回答道，这些子弹接受了这么大的速度，以致它们失去了它们的重量并飞离了地球。

牛顿的预测不适用于上升以后又下落的物体，而是适用于从静止点下落的物体。这个实验被他的同时代人胡克作过。胡克向皇家学会报告说，他“发现在上述所有的实验中每一个弹丸都落到通过垂直悬吊着的同样的弹丸所求出的垂直点的东南方向。”这些实验是在露天做的，其结果多少有些不一致。“但是”，胡克说，“在室内做实验也是成功的。”[2]这奇怪的偏南的分量通常归因于观察的错误，但是，1791年，加格利耳米尼在波洛尼亚（Bologna）的塔上做了实验，1802年本岑伯在汉堡的圣米迦勒塔（St·Michael's tower）上做了实验，1831年赖希在萨克森 82

〔1〕 如果由于大气所发生的扰动可忽略，则子弹将稍微偏西落下。见W.Ferrel, *A Popular Treatise on the Winds*, New York, 1889, p.88.

〔2〕 Birch, *History of the Royal Society*, London, 1757, Vol. Ⅲ., p. 519; Vol. Ⅳ, p. 5; 也见Ball, *An Essay on Newton's "Principia"*, pp.146,149,150.

（Saxong）的弗赖贝格（Freiberg）的矿井下做了实验，所有这些实验都证明，除了预期的偏东以外，还有一个小小的偏南的位移。[1]所有的作者都同意一个物体偏向于从起始点悬吊着的铅垂线的东方，但在关于沿子午线测量的偏离，在理论基础上有不同意见。拉普拉斯发现没有子午线的偏离，高斯确实发现有一个小小的向南偏离。高斯的普遍性结论被华盛顿大学的罗弗在不久前所证实。[2]

以弹道曲线描述的抛物体的实际路径和伽利略的抛物线有相当大的偏差。在数学上处理它几乎是很难办到的。由于地球的转动，这路径在北半球稍微倾向右方。每一个打棒球或网球的人都知道，空气的阻力使转动球体的路径复杂化了。[3]

83

光　学

折射定律

折射定律是莱顿的力学教授斯涅耳（1591—1626）发现的。他从未公布他的发现，但是，惠更斯和伊萨克·沃斯两人声称曾审查过斯涅耳的手稿。他以不方便的形式把折射定律叙述如下：在相同的介质里入射角和折射角的余割之比总是保持相同的值。

---

〔1〕 Rosenberger，同19页注〔2〕，Part Ⅲ.，pp.96，97，432—437. J.F.W. Gronau, *Historiche Entwicklung der Lehre vom Luftwiderstande*, Danzig, 1868, pp.1—28.

〔2〕 见*Washington University Studies*, Vol.Ⅲ., 1916, p.153—168.

〔3〕 关于地球转动的影响，参阅W.Ferrel，同81页注〔1〕，p.86；Poisson, *Journ. École Polytechnique*, XXVI., 1838.同上XXⅦ.，1839，泊松考虑了它们在空气中转动的影响。也见Magnus, *Poggendorff Annalen*, LXXXⅧ.，1853，p.1.

由于余割和正弦成反比，这个叙述等价于现代形成就很明显了。迄今就我们所知，斯涅耳没有试图做这个定律的理论推导，但是他用实验验证了它。象在现代书本中看到的那种正弦定律是笛卡儿于1637年在他的《屈光学》一书中作出的。他没有提到斯涅耳，可能是他自己独立地发现了这个定律。[1]笛卡儿没有做实验，但他从如下的假定从理论上推导了这个定律：（1） 光速在较密的介质中较大（现在知道，这是错误的）；（2） 在相同的介质里这些速度对各种入射角都有相同的比率；（3） 在折射时，平行于折射面的速度分量保持不变（现在知道，这是错误的）。这些假定不大可能是正确的，这引起了数学家费玛和其它人着手去证明它。费玛从下述假定推出了这个定律，即光以最少的时间从一种介质的某一点传播到另一种介质的某一点，而且在较密的介质中光速较小。[2]

光　速

84

十七世纪的一个伟大成就是光的逐渐传播的发现。以前通常

〔1〕 关于这个问题有各种看法：黑勒(Heller)，（Vol.Ⅱ., *pp*.65, 78)论证了独立发现的观点；波根多夫(Poggendorff)（同13页注〔3〕*p*. 312）和罗森贝格尔（Rosenberger)，（同19页注〔2〕Part Ⅱ., p.113）倾向于笛卡儿是从斯涅耳那里剽窃来的。另一方面，阿拉哥主张是笛卡儿一个人发现的。见阿拉哥的 *Biographies*, 2d Series, Boston, 1859, *pp*.187, 188中的“Fresnel”。克雷默(P·Kramer) 详细讨论了这个问题，见他的 *Zeitsch.f.Math.u.Phys.*, Vol.27, 1822, Supplement, *p*.235, 以及在发现一些新的文献以后，科特弗(D.J.Korteweg)又详细地讨论了这个问题，见他的 *Revue de Métaphysique et de Morale*, July, 1896, *pp*.489—501.

〔2〕 Rosenberger, 同19页注〔2〕Part Ⅱ.*p*,.114.

假定光的速度是无限的。伽利略首先尝试测量光速。[1]他确定了A用灯光把信号传到B并收到从B回来的信号所需要的时间。这个实验是在晚上当两个观察者紧靠着站在一起，以及当他们相距近一哩时分别进行的。如果能发觉有时间差，那么，光是以有限的速度传播。伽利略不能从他的实验解决这个问题。但是，他提出了一个完全不同的问题，这问题偶然地导致另一个研究者取得成功。他评论道，在木星后面的木卫时常消失可以用来作黄经的测量。大约在1642年，意大利的天文学家卡西尼是被路易十四（Louis XIV）召到巴黎的大科学家之一，他对木星系作了长期的研究。约三十年以后，一个年轻的丹麦人勒麦（1644—1710）被劝告移居巴黎。他出生在奥尔胡斯（Aarhus），并曾在哥本

85 哈根学习。他在巴黎和让·皮卡特一起观察了木卫的食。他们注意到，这些卫星在它们的轨道上运转的时间在一年的各个时期不都是相同的，并且当木星的视大小变小时，这运转的时间大于平均值。考虑到实际的运动有任何这种不均等性是极少可能的，勒麦这才相信观察到的不规则性必定阐明了光速是有限的假设。在1676年9月勒麦对法国科学院讲到，发生在11月的下一次第一个卫星食的时间要比根据8月的观察进行计算所得到的时间迟十分钟左右，这个矛盾可以用假定光从木星到地球需要时间而得到解释（见图11）。在11月9日，这次食发生在5时35分45秒，而据计算，它应该发生在5时25分45秒。11月22日他向科学院更详细地解释了他的理论，并讲到，光穿过地球的轨道需要22分钟（现在所知道的更精确的值为16分36秒）。科学院没有立刻接受勒麦

86 的理论。皮卡特赞成这理论，而卡西尼不赞成。勒麦根据的是他对第一个卫星的计算，他坦率地讲到，从观察其它三个卫星中所作出的类似计算可能不会成功。在卡西尼的心里，这个事实有力地反对了接受勒麦的解释。关于这三个卫星的行为，勒麦只能

〔1〕 Crew and de Salvio，同39页注〔1〕，*pp*.43，44.

说："它们的不规则性尚未被测定。"在1680年，卡西尼发表了关于木卫的修正推算表，但是没有提到勒麦的假说。

这个年轻的丹麦人的声誉提高到这样的程度，他做了法国皇太子的私人教师，并且在1681年，克利斯汀五世(ChristianV.)把他召回到丹麦任皇家天文学家。在勒麦回到祖国以后，对他的理论的信心在巴黎衰落了。人们不知道他关于这个问题又作了多少工作，也不知道他是否排除了因其它卫星所提出的异议。他留下了许多天文观测资料，这些资料在1728年使哥本哈根城荒芜的那场大火中几乎全被烧毁了。[1]

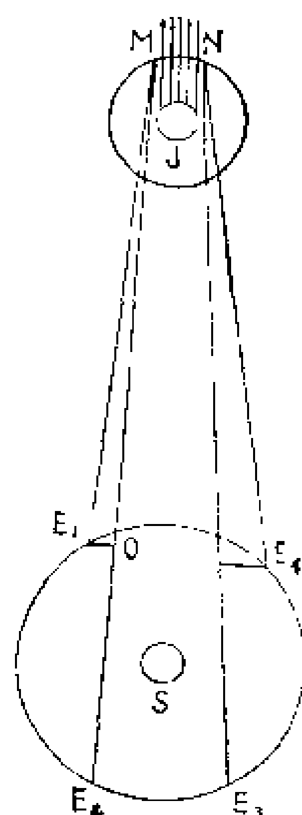


图11 **勒麦的光速测定法。**

当地球从E_1转到E_2时，第一个木卫食的时间比从它的平均运转周期中计算所得的时间迟几分钟。勒麦把这误差解释为由于光行走OE_2距离多费了时间。当地球从E_3运转到E_4时，食的发生时间要比预计的早。

勒麦的理论在英国得到了哈雷的热情支持，并被布喇德雷（1693—1762）以意料不到的方式所证实。布喇德雷后来是牛津的萨维利安（Savilian）天文学教授。当他努力于测量星体的视差时，他惊讶地发现它的位移并不全象他所预料的那样（图12)。当意料不到的光明降临到他身上之时，他已几乎丧失了能解释这现象的希望。"在1728年九月的某一天，他

〔1〕 我们用了韦尔尼克(Alex Wernicke)论勒麦的一篇文章，*Zeitsch.f.Math.u.Physik*, Vol.25.1880, Hist. Abtheil., *pp*.1—6；也见W.Doberck, *Nature*, Vol.17,1877, *p*.105.

87

和同伴们很愉快地在泰晤士河上乘船航行，他观察到，似乎每一次船转换方向时风都变了向，向船夫提出的一个问题引起了（对他来说）很有意义的回答，即，桅杆顶上风标方向的变化仅仅是由于船的航向的变化，而风全然如故。这是他所需要的暗示。他立刻猜想到，光的前进的传播跟地球在它的轨道上的前进相结合时，光的前进传播肯定产生每年一度的方向变化，天体的变化在这种方向上是通过依赖于这二者的速度之比而被看见的。”[1]（见图13）布喇德雷从这个“光行差”的值估计太

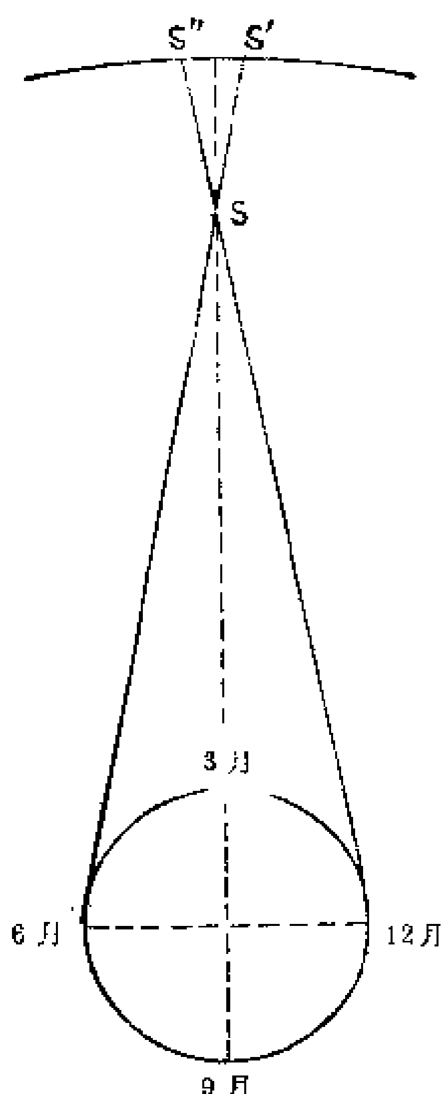


图12　**布喇德雷试图测量γ座的视差。**他预料从六月到十二月会显示星体从S′到S″的表观运动，而在三月和九月星体居于天球的中间位置。事实上，六月和十二月的位置相同，他没有发现视差的影响。但奇怪的是，在三月和九月星体却不在相同的地方出现。

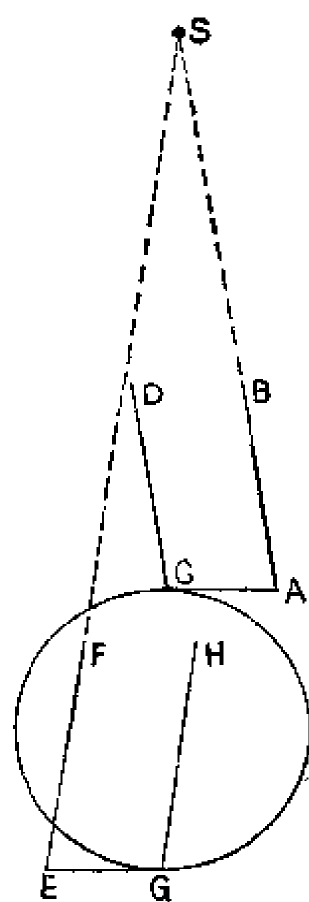


图13　**所谓光行差的影响**

令AB为望远镜的方向。当地球载着观察者从A向C运动时，光线走过了望远镜的长度。当光线达到眼睛时，望远镜是在CD位置上。同样，六个月后，G点的观察者的望远镜指向了GH方向。CD和GH约有40秒的偏角差。

〔1〕“Bradley, James”, in *Dic. Nat. Biog.*.

阳光以8分13秒的时间到达地球。这个值比上半个世纪勒麦测定的11分更接近正确值。这样一来，布喇德雷证实了勒麦的理论，光的渐进传播开始作为一个已确立的事实而被接受。

布喇德雷发现以牛顿的光的微粒说很容易解释光行差。光粒子象垂直下落的雨滴那样行动，当我们向前跑时，似乎雨滴是迎面而来。当望远镜本身被地球的运动带向前时，光的微粒就落进了向前倾斜的望远镜筒里。用菲涅耳和杨的光的波动说来解释就较复杂些。正如我们将要看到的一样，它涉及到以太的存在及其作用的问题。

惠更斯的波动说

在1678年法国科学院的一次会议上，勒麦，卡西尼和其它人出席了这次会议，**惠更斯**（1629—1695）提出了一篇关于光的理论的令人注意的论文。惠更斯出生在海牙，在莱顿大学学习过。 88
笛卡儿在细读了他的最早的一些数学定理后，便预言他的前途是伟大的。路易十四（Louis XIV）劝他迁居到巴黎，从1666年到1681年他一直在巴黎。象他的伟大的同时代人牛顿和莱布尼兹一样，惠更斯也从未结婚。

以上所讲的惠更斯在1678年的论文《论光》是在1690年发表的。[1]这是在解释光的波动理论方面的最早的重要尝试。在惠更斯之前，胡克在1665年作出了这样一种理论的粗略的轮廓。惠更斯发展了以他的名字命名的关于波的传播的重要原理。他把振动介质的每一个质点都看成一个中心，在它的周围形成一个波。这样一来，在图14中，如果DCF是从作为中心的A点开始的球

〔1〕 再版德文译文在奥斯特瓦尔德的*klassiker*, No.20.又参阅*OEuvres Complètes de Christiaăn Huygens, Publicées par la Société Hollandaise des Sciences*, La Haye, 1888—1895,

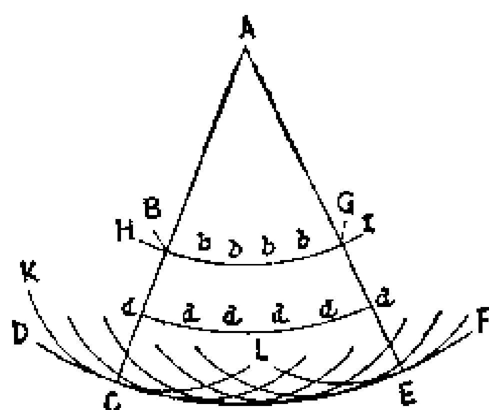


图 14

面波，那么在这球面内的质点B将是和DCF相切于C点的球面波KCL的中心。同样，在球面DCL内的每个质点又都形成了它自己的波。所有这些无数的微弱的子波都是球面波，每一个波都跟DCL相切于一点，并且都有助于DCL的形成。惠更斯假定存在着无所不在的以太，他以现在教科书中流行的方式，用波动论解释光的反射和折射。他还详细地研究过大气折射和奇怪的冰洲石的双折射现象。1669年哥本哈根的巴托利努斯第一次在冰洲石上观察到光线的这种分开〔现象〕。惠更斯还给出了画平常光 89 线和非常光线的路径的方法。并观察到这些光线是偏振的。他假定了在以太中的振动是纵向的，如同声音一样，因此，他不能解释奇怪的偏振现象。他也不能以他的理论解释颜色的起源。他致力于从波动论推导出光在均匀介质中直线传播的事实。他的论证不是无争论余地的。牛顿所以否定波动说的主要理由是由于它显然不能满意地解释光为什么直线传播。牛顿以他的大权威的身分支持光的微粒说，并且有一个多世纪惠更斯的观念被搁置一边并被忽视。

牛顿的棱镜实验

牛顿的光学研究是最重要的研究，并且给出了非常有力的证据。牛顿最先作了关于日冕的观察，时间可以追溯到他在1664年的学生时代。后来他才作关于色散的实验。“在1666年（在那时我让我自己磨制除球形以外的其它形状的光学玻璃）我给我自己找到了一块三角形玻璃棱镜，用它试验了那有名的颜色现象。”

在很久以前人们就从白光中观察到了颜色的形成。辛尼加（公元2—66年）讲过虹的颜色和玻璃片的边缘形成的那些颜色是一致的。布拉格（Prague）的医学教授马尔齐、格里马耳迪、笛卡儿、胡克和其他一些人都讨论过白光分散或聚集成颜色的问题。[1]牛顿在剑桥的老师巴罗主张类似于马尔齐的一种理论，认为红光是大大地浓缩了的光，紫光是大大地稀释了的光。这些复杂紊乱的状况留待牛顿去解决。在牛顿之前，由棱镜产生的折射被假定是实际上产生了色，而不是仅仅把已经存在的色分离开来。

牛顿在一间暗室里在窗板上开了一个小圆洞，并且把一块棱 90 镜放在室内近孔的地方，因此光被折射到对面的墙上。"把这个有色光谱的长度和它的宽度相比较时，我发现长度比宽度约大五倍——如此过份的不匀称，以致使我比对考察它是从哪里产生的通常的好奇心更为激动。"[2]

在达到正确的解释之前，他提出了几种假说，结果却发现，每一种假说都被事实所否定。这些推测之一是今天大学里的学生们特别感兴趣的，它似乎表明，在牛顿的深邃的思想中详述了现代体育技巧中有名的一种技巧，这就是"旋转球"。肯定现在的学生们会认为，难以猜想牛顿怎么会设想球场上快速旋转球和光学理论之间存在着某种可能的关系。在这点上牛顿说："那时我开始怀疑，这些光线是否在它们通过棱镜以后以曲线前进，并按

---

〔1〕金尼阁*神父(Pater Trigautius) 在他到中国传教的记述中讲到，由于棱镜的颜色效应，它们有很高的价钱，它通常只为高官贵族所有，一块简单的棱镜就得花 500 块金元。Priestley, *Gesch.d.Optik*，由克吕格尔 (G.S.Klügel)翻译，Leipzig, 1776, *p*.132.

* 传教士金尼阁(1577—1628年)法国人，1610年来华——译者注。

〔2〕*Phil.Trans.*, Abr., Vol. I., *p*.128. 牛顿在1672年把这篇文章寄给了皇家学会。

照它们或多或少的弯曲性向着墙的若干个部分运行。当我回想起我经常看见的网球以斜拍打出去时，就画出了这样的一根曲线，因而增加了我的怀疑。因为，一个旋转的也是前进的运动被那一拍传给它，在运动发生的那一面上，它的各个部分肯定是比在另一面上更强烈地挤压和打动毗邻的空气，而且在那里引起了空气的抵抗和反作用也相应地更大。由于同样的道理，如果光线可能也是球形物体，并且当它们从一种介质斜穿过另一种介质时获得了旋转的运动，在运动发生的那一面，它们应当受到围绕着它的以太的更大的阻力，因此，它是连续地弯向别处。但是，尽管这怀疑似乎有合理的根据，而当我开始考察它时，我没有能够在光线里观察到这种旋转性。除此之外（对我的目的而言，这些是足够的）我观察到，像的长度与透光孔直径之差比例于它们的距离。 91

“这些怀疑的逐渐消除终于导致我作了判决实验，这个实验是这样：我取两块板，把其中一块放在靠近窗户的棱镜后面，我在这块板上做一个小孔，使光线可以通过这个小孔并落到另一块板上，我把另一块板放在约有12呎远的地方，在第二块板上也先做一个小孔，让入射光线的一部分通过它。然后，我把另一块棱镜放在第二块板后面。”让第一个棱镜绕它的轴转动，使得落在第二块板上的像上下移动，同时使光线的所有部分都能相继地通过该板上的小孔，并射到它后面的棱镜上。记下光线落在墙上的地方。我们看到，在第一个棱镜上被折射得最厉害的蓝光，也在第二个棱镜上受到最大的折射，红光在这两个棱镜上都被折射得最少。“因此，那像的长度的真实原因被发现了，这原因不是别的，正是由于光不是同类的或均匀的，而是由不同类型的光线组成的，其中的一些比另一些更能被折射。”[1]（见图15）

92 当牛顿做这些实验时，他对改进折射望远镜发生了兴趣。在

〔1〕 *Phil. Truns, Abr., Vol. I., p.130.* 在牛顿的*Opticks*, Book. I., Props. I—V中也描述了这些实验。

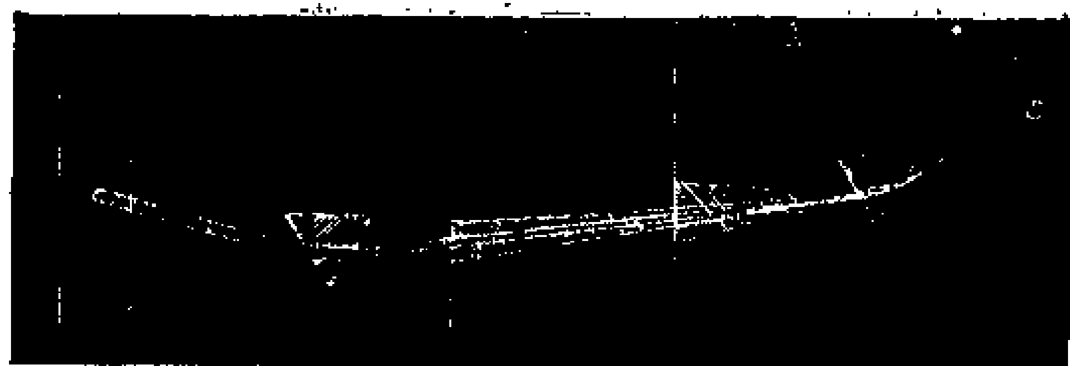


图 15

那种仪器上的明显的缺点就是总是出现球面象差，因此试图改变透镜的球面形式以便得到清晰的像。牛顿自己确信，除了球面像差以外，还有另一种麻烦的来源，即色差。“通过折射体，由于杂色光而看到混乱的物象是起因于几种光线的不同的可折射度”（《光学》第一卷命题V）。能排除这种弊病吗？如果不同的物质具有不同的色散率，那或许可以消除这种弊病。因此，牛顿设计了一种实验。在一个灌满水（或者注入铅糖溶液）的棱形容器里，[1]他放入一个玻璃棱镜，并考察了通过的光线。从他的实验中，他认为他能作出结论：折射必定总是伴随着色散。在他看来，消色差透镜似乎是不可能的。显然，在这里，牛顿没有采取他通常的谨慎态度。他碰巧使用了具有相等色散率的一个玻璃棱镜和水。跟他注入的水不同，用其它的液体都会得出不同的结果。从很有限的实验证据中，他作出了一个广泛的推论，并且惊人固执地坚持他的意见，但后来的实验证明，他的这个推论是错误的。牛顿没有以适当的谨慎考虑列日（Liège）的耶苏会会员卢卡斯提出的批评。在重复牛顿的棱镜实验时，卢卡斯发现，光谱的长度不象牛顿所断言的那样是它的宽度的五倍，而仅仅是它的宽度的三又二分之一倍。这是在简单地比较光谱的长度和宽度方面——可以想象得到的最简单的测量之一——的一个很大的分

〔1〕 *Opitics*, p.51; “Newton, Isaac”, in *Dic.Nat Biog*.

歧。两个有才能的实验者之间怎么会发生这么大的差异呢？这个问题没有得到适当的研究。多半是牛顿感到，他的测量重复做过多次，并且他是不会弄错的。虽然他对化学感兴趣，但他没有想到棱镜的玻璃品种可能会在实验中起作用。这样，他由于倔强的怪脾气而失去了关于色散率的可变性和制成消色差透镜的可能性的重要发现。

反射望远镜的发明

当牛顿没有达到关于折射望远镜的目的时，他却取得了关于反射望远镜的漂亮的得分。他被公正地看作是后者的发明人之一。在那时，反射望远镜是受到相当重视的课题；罗马的耶苏会会员祖基（1586—1670）被认为是这仪器的最早设计者 另一个耶苏会会员、法国的默森提出了反射望远镜的一种样式；提出这种式样的好象还有苏格兰的数学家和天文学家J.格雷戈里（1636—1675）。但是他们都没有完成他们的设计。牛顿画出了他自己的设计图，并且他是第一个制造反射望远镜的人。这是在1668年，〔他造的第一个反射望远镜〕有六吋长，直径一吋，放大30到40倍。后来他做了一个更大的反射望远镜，并在1672年把它赠送给皇家学会。它上面的题词是，“伊萨克·牛顿爵士发明并于1671年亲手制造。”它曾被送给国王看过，并且受到胡克、雷恩和其它人的审定。它受到极大的赞美，其说明书送给了巴黎的惠更斯。[1]这个望远镜被保存在皇家学会的图书馆里。

牛顿的进一步研究、他的评论者

牛顿的发现受到了皇家学会的极好的评价，然而一旦把它们

〔1〕 H.Servus, *Gesch.d.Fernrohrs*, 1886, pp.121—132; D.Brewster, *Life of Sir Isaac Newton*, New York, 1831, p.40,

发表在《哲学会报》上时就受到了一些评论家的反对，如利尼斯、卢卡斯、帕德斯、胡克、惠更斯。牛顿对于这些批评过度敏感，他在1675年12月9日写给莱布尼兹的信中说道："我因我的光的学说发表所引起的争论而感到如此的烦恼，以致于我责怪我自己离开对我是如此重要的幸福——我的平静——而跑到了一个幽灵后面的轻率行为。"

94

胡克赞成光的波动说，同时反对牛顿的微粒说。牛顿给胡克的回答，以及在1672到1676年之间交流的其它论文，表明他认真地估计了每一个假说的反对论据。我们会容易地想象到，这个年轻的科学家是怎样深思过这两种对立的学说；当他踌躇地否定波动论时，他从未梦想到自己的观点会得到这么大的权威，而使物理学家的偏见达到这样的程度，以致使接受波动说整整延误了一个世纪。牛顿试验了薄膜形成的颜色。[1]他清楚地看到波动说可以怎样来解释这个现象。"因为蓝光和紫光的振动是被假定为比红光和黄光的振动更短，它们在一块较薄的薄片上必定被反射；这就足于解释那些薄片的或泡沫的所有的通常现象，也足以解释其成分象这样的薄片的许多碎片一样的所有自然物体的所有通常现象。这些似乎是这个假说的最清楚、最真实和必需的条件；并且它们和我的学说是这样地严密一致，以致于如果批评者认为适当地应用它们时，由于这种原因他不需要耽心会与事实有什么背离；但是至于他怎么来克服其它许多困难，我就不知道了。"[2]在牛顿的思想中，波动论在那时所面临的不可逾越的困难是不能

---

〔1〕 "牛顿环"是在牛顿的发表于1704年的《光学》第二卷观察I及其如下等等中阐述的。波意耳和胡克观察过薄片的颜色。后者对肥皂泡和压在一起的玻片之间所显现出来的色环的主要现象作了正确的解释。

〔2〕 *Phil, Trans*. Abr. Vol. I. p. 145; G. Peacock, *Miscellaneous Works of the Late Thomas Youong*, Vol. I., *pp*. 145, 146.

95 解释光线的直线路径。他说："在我看来，基本的假定本身似乎是不可能成立的。这个基本的假定就是象光线一样的任何一种流的波动或振动都能够以直线传播，而不会有连续的和过度的蔓延，不会以某种方式弯进这种使它们终止的静止介质中。如果实验和证明二者都没有矛盾，那我就错了。"[1]如果光象声一样是由振动组成的，那它将要"弯进黑暗的地区。"

另一方面，微粒说容易地解释了光的直线传播。一个发光的物体发射出以直线运动的微粒子流，它们对视网膜的冲击引起视觉。折射是以这样的假定解释的，即飞行的粒子当它非常靠近折射面时就开始被引向折射面，以致它沿着法线方向的分速度增加了。当粒子从较密的介质进入较稀的介质时，这个速度分量减少了，而垂直于法线方向的分速度在这两种情况下都保持不变。这样一来，光线的屈折就被解释了。其结果是，粒子通过较密的介质时速度较大。[2]事实上，在透明物质中要以发射说解释折射和反射二者都存在是很困难的。在一个面上怎么会此时是折射一个入射粒子而彼时又是反射一个入射粒子呢？为了要说明这一点，牛顿提出了既容易反射又容易透射的"痉挛"理论，这种痉挛是由无所不在的以太传递给粒子的。[3]飞行粒子列使近表面处的以太进入一种相继压缩和稀疏的扰动之中。一个飞行粒子在压缩的
96 时刻达到表面上时就被抛回；如果这个粒子是在以太稀疏的时刻到达，那么它的路径便较少障碍，它就通过这个表面。这就是牛顿的解释：一个玻璃面或水面如何部分地反射而又部分地折射由飞行粒子组成的光线。我们看到，牛顿的微粒说不仅假定存在有

---

〔1〕 *Phil.Trans.*, Abr., Vol.I., p.146; *Miscellaneous Works of Thomas Young*, Vol.I., p.152.

〔2〕 牛顿的*Opticks*, 1704, Book II., Part III., Prop.X.

〔3〕 *Opticks*, Book.II., PartIII., Prop XIII.; 也见T.Preston, *The Theory Of Light*, ad, ed, 1895, p.19.普雷斯顿对微粒说作了一个极好的概述。

构成光的飞行粒子，而且还假定存在以太——它包含了波动说所需要的全部机制，甚至更多。

牛顿解释了虹，这个解释的正确的梗概早先被安东尼·德·多米尼大主教在1611年出版的一本书中讲到了，也被笛卡儿和惠更斯解释过。

牛顿还实验过光的衍射（“拐折”）。这个现象是由波洛尼亚的耶苏大学的数学教授格里马耳迪（1618—1663）发现的。在他的1666年出版的著作《光的物理数学》中描述了这个现象。格里马耳迪通过一个小孔把光束引入暗室。让光束中的一根竿形成的影子落在白色的面上。使他感到惊讶的是，他发现这影子比以计算得出的几何影子更宽；加之，这影子跟一个、两个、有时是三个色带相邻接。除此之外，当光很强时，他看到色带进入影子里面。以一个带有小孔的不透明的板在那里代替这根竿，假定光线以精确的直线通过这小孔的边缘，结果发现发光圈实际上要大于预期应该有的大小。这个以及其它的实验确立了光线略微地绕过边缘的事实。他把这新现象称之为“衍射”。[1]

格里马耳迪的实验是做得很好的，但是他对光学理论却不能作出任何实质性的贡献。牛顿以修改了的形式重复了格里马耳迪的实验，并尽量用微粒说来解释它们。[2]

值得注意的是，牛顿用太阳光谱作了那么多实验而没有观察到夫琅和费线。我们不能认为这个失败是由于他通过一个圆孔把 97 光引入的缘故，因为在某些情况下（《光学》第一卷，命题Ⅳ，第49页）他用的是一条狭缝。也不能认为是由于他为了要在小孔上接收发散的光而把他的棱镜放在靠近小孔处的缘故，因为刚才谈到的例子中棱镜放在距缝10或12呎远的地方。他在纸上接受光谱的事实必定不会妨碍他看见黑线；总而言之，他有时“通过棱

〔1〕 Rosenberger，同19页注〔2〕Part. Ⅱ., *pp*. 131, 132.

〔2〕 见*Opticks*, Book, Ⅲ., *pp*. 113—137.

镜看小孔”（第一卷、命题Ⅱ，实验4，第22页）。在这个实验中（第49页），其条件和沃拉斯顿后来看到了几条谱线的那些条件约略相同。不幸的是，在发现夫琅和费线十分容易的一些实验期间，牛顿不得不依靠一个比他自己的眼睛“更灵的”助手来观察，[1]这个人可能对没有预料到的现象缺少敏感。

热　学

温度计的发展

在十七世纪期间，我们目击了温度计的最初的发展，这个物理仪器几乎比任何其它一种仪器都得到更广泛的应用。现代的历史研究一致同意把温度计的发明归功于伽利略。[2]一个象麦秸那么粗的长玻璃管，其一端带有鸡蛋大小的玻璃泡，并把玻璃管浸入水中，通过把玻璃泡预先受热，使水沿管子升高一些，这就构

〔1〕 Book. I., Part Ⅱ., Exp.7.p.92；也见约翰逊(Alexander Johnson)的关于“Newton, Wollaston, and Fraunhofer Lines”的文章，载于*Nature*, Vol.26, 1882, p.572.

〔2〕 E·Wohlwill, “Zur Geschichte der Erfindung und Verbreitung des Thermometers,”*Poggendorff's Annalen*, Vol.124, 1865, pp·163—178. F·Burckhaudt, *Die Erfindung des Thermometers und Seine Gestaltung im* 17·*Jahrhundert*. Basel, 1867；E·Gerland, *Das Thermometer*, Berlin, 1885。我们大量地引用了Gerland发表的文章。有的人把温度计的发明归功于荷兰的有名的机械师德勒贝尔(Cornelius Drebbel)，有的人把它归功于帕多瓦的解剖学家桑托留斯(Sanctorius)，有的人把它归功于克拉科夫的神父保罗(Father Paul of Cracow)，有的人把它归功于伦敦的医生弗拉德，(Robert Fludd)，有的人把它归功于德国的盖里克。

成了伽利略的第一个温度计。当然，它要受到大气压以及温度起伏的影响，它实际上是一个温度气压计。伽利略的学生维维安尼给出这个发明的日期是1593年；伽利略的另一个学生卡斯特里说，在1603年他看到伽利略在实验讲演中用了它。所有早期的温度计都含有空气，管子上的刻度是任意刻划的。由于受到大气压变化的影响，伽利略的空气温度计是很不完善的。

法国的物理学家让・雷作了第一个改进，[1]他简单地倒转了伽利略的温度计，将水注入玻璃泡内而将空气留在玻璃管中。于是，水成为测量物质。在1632年1月1日，他把这个方法告诉了科学家中伟大的中介人默森。因为雷自己不能封闭玻璃管的上端，由于水的蒸发经常有出现误差的危险。施文特说，在1636年以前，工匠们成功地选择了玻璃泡和玻璃管的相对大小，使液体在一年的过程中在整个玻璃管的长度内升降。

就某些人而言，温度计的升降提供了永动机的一个例子，有一个作者实际上把这个仪器称之为"表示热和冷的程度的永动机。"[2]

在让・雷的革新以后25年，密封管子的思想被佛罗伦萨的院士们提出了，他们可能根据托斯卡纳的大公爵弗迪南二世（Grand Duke Ferdinand Ⅱ, of Tuscany）的建议。玻璃泡装的是酒精，并把刻度附在玻璃管上。

这些院士们（并不比缪斯们多*）都是伽利略的学生，他们成立了有名的西门图科学院（Accademia del Cimento）。在这小小的组织里一度在意大利恢复了伽利略的精神；但是这个学会仅存在十年时间，即1657—1667年。这么快解散的原因是什么？根

---

〔1〕 G. Hellmann, *Himmel und Erde*, Vol. Ⅱ., p.172; E. Gerland, 同上, *p*.10.

〔2〕 见E・Wohlwill, 同上, *p*.169.

* 缪斯（muse），古希腊掌握文艺、诗歌、音乐、舞蹈、天文、历史等的九位女神 ——译者注.

99 据一些作者的说法，[1]大公爵的兄弟德·梅迪奇（Leopold de' medici）只有在解散科学院的条件下才能被授予红衣主教的职位。按照另一些人的说法，[2]在他们成员之间发生了纠纷。

在这科学院组织之前，意大利人已在气象学方面作了许多工作。除了发明温度计和气压计之外，他们还发明了雨量计，在1639年卡斯特里第一次使用了它。[3]为温度计选择两个固定的温度并把这间隔再分成为适当的度数的问题是由西门图科学院处理的。遵照哲学家和医生们的榜样，他们选择了冬冷和夏热作为两个固定点，把其间距分为80或40个相等间隔。为了更准确地决定这些点的位置，他们规定其中一个固定点是在最冷的冰冻时期的雪或冰的温度，而另一个固定点为奶牛或鹿的体温。他们已发现冰的溶点为常数，并在他们的医学温标中记为$13\frac{1}{2}°$。1829年在旧的玻璃器具中发现了佛罗伦萨的一些温度计，并且利布里真的发现，他们读出溶解的冰的温度$13\frac{1}{2}°$。它们在佛罗伦萨被用于气象观察有16年之久，而且通过把平均温度转换为一个现代温标并与现代的观察结果相比较时，利布里认为他能作出这个推论，即佛罗伦萨的气候在200年内仍然如故。[4]

虽然对佛罗伦萨西门图科学院所选择的这两个固定点并不认100 为满意，并提出了所有种种改进。达兰塞在1688年采用了（1）结冰时的空气的温度，和（2）熔化奶油的温度。虽然惠更斯早在1665年就提出了要用化冰或沸水的温度作为固定点[5]，但是直到十八

〔1〕 Poggendorff，同13页注〔3〕*p*. 351；Rosenberger，同19页注〔2〕，Part Ⅱ.，*p*.162.

〔2〕 Gerland，同96页注〔2〕，*p*.45；也见他的在*Wiedemann's Annalen*，Vol.Ⅳ.，*p*，604上的文章。

〔3〕 G.Hellmann，同上页注〔1〕*p*.178.

〔4〕 Libri，*Poggendorff's Annalen*，Vol.21，*p*.325；也见Gerland，*Das Thermometer*，*p*.45.

〔5〕 E.Gerland，*Zeitschr*.*f*.*Instrk*.，Vol.13，1893，*p*.390.

世纪才最后采用这两种温度。

佛罗伦萨的温度计逐渐闻名了。波意耳把它们介绍到英国。它们经过波兰又传到法国。大公爵在1657年把温度计和其它仪器赠送给波兰皇后的使节。他的大臣把一个温度计送给了巴黎的天文学家布利奥，并且说，“大公爵在他的口袋里总是带着一个温度计。”[1]这温度计约100厘米长，含有酒精。布利奥自己在1659年制造了一个温度计，这是第一次（就我们所知）把水银用作测温物质的温度计。由布利奥观察的从1658年5月到1660年9月的温度计录最近已被发现。仅次于开始于1655年的佛罗伦萨的记录，这是现存的最古老的温度记录。[2]

运动生热

我们惊讶地发现，牛顿的上一辈已预料到我们现代的热理论。《热是运动的一种形式》是丁铎尔的闻名的著作标题（1862），然而，笛卡尔、阿蒙顿、波意耳、弗兰西斯·培根、胡克和牛顿都已把热看作是运动的一种形式。当然，在十七世纪，这个理论只有相当微弱的实验证据作为基础，否则十八世纪的哲学家们就很难不考虑这个学说了。波意耳作了用力学方法产生热的实验，并以铁锤敲打钉子这样的例子说明发热是由于运动被阻止的结果。

波意耳还观察了大气压对沸腾的影响，并以结冰的混合物进行实验。牛顿于1701年在《哲学会报》中的叙述包括了下面这个假设，即一个物体冷却的速率正比于它超过周围介质的温度值。[3]这个推测后来得到杜隆和珀替的实验检验，并证明这仅仅在小范

〔1〕 Maze, *Comptes Rendus*, Vol.121, 1895, p.230.

〔2〕 同上，Vol.120, 1895, p.732.

〔3〕 Mach, *Princ. d. Warmelehre*, p.132.

围温度内才是正确的。[1]

电　和　磁

磁偏角的长期变化

改正吉尔伯特的关于磁偏角“在一个给定的地方是一个恒量”的错误主张，以及发现“磁偏角的长期变化”，人们通常把这些归功于格雷沙姆大学（Gresham College）的教授**吉利布兰德**（1597—1637）。他指出：1580年“伯罗斯先生（Mr.Burrows）（在数学方面具有真才实学的一个人）”发现了伦敦附近的磁偏角为偏东11°51′；而在1622年**冈特**（1581—1626）在同一个地方发现它是偏东6°13′；在1634年他本人又发现它的偏东不会大于4°。[2]这个问题受到**哈雷**（1656—1742）的密切注意，他是牛津教授，后来又是皇家天文学家。他竭力试图以假定四个固定的磁极来解释磁的变化。因为这个假定不能说明事实，他又设想地球是由两个同心磁球壳组成的，这两个磁球壳的极位于不同的地点并跟地理极不一致，内部的磁球壳还在缓慢地转动。为检验他的假说，在1698年威廉三世（William Ⅲ）被说服派哈雷到大西洋和太平洋远航。[3]他回来时，没有得到所预期的证明，但得到关于“〔磁偏角〕变化”的有用的观察。约十八世纪初他绘了磁偏角等变化的地图，这张图是很闻名的。他的原始的等〔磁〕偏角地图之一最近在英国博物馆发现。看来他发表了两

〔1〕 *Ann.de chim.et de Phys.*2e, Vol.Ⅶ.,1817, *pp*.225,237.

〔2〕 参阅Henry Gellibrand, *A Discourse Mathematical on the Variation of the Magneticall Needle*, London, 1635.再版于G.Hellmann's *Neudrucke*, No.9, Berlin, 1897.

〔3〕 Benjamin，同11页注〔2〕，*p*.448

张完全不同的图。[1]

一些有趣的观察是，在1676年和1684年的《哲学会报》上记载的关于闪电的磁效应。象这样的事在1681年发生过，开往波士顿的一条船遭到电击。对星星的观察表明“罗盘变向了”，“指北针明显地转向指南”。这条船以倒转的罗盘开到了波士顿。[2]

电的吸引和排斥实验

电的吸引和排斥一直是研究者感兴趣的和作为娱乐的现象。因此，波意耳观察到干毛发很容易通过摩擦生电。“恢复了一定干燥度的一绺假发，会被一些人的皮肤吸引，我在两个戴着假发的美丽的女士身上得到了证据，因为我有时观察到她们无法防止头发飞到她们的脸颊上并在那里飘打，纵使她们俩都不需要装饰或都不是用于装饰。”有一个女士“允许我进一步满足我的愿望；我要她在适当的距离内用她温暖的手拿出那些假发的一绺，并放在自由的空中，当她一旦作到了这一点，自由的发结下端，立刻就附着在她的手上。”[3]

再则，牛顿描述了用装在黄铜环上的圆玻璃杯做的实验，玻璃杯被圆铜环吊起约有1/8吋高，这个描述使皇家学会感到惊 103

〔1〕 L.A.Bauer, "Halley's Earliest Equal variation Chart," *Terrestrial Magnetism*, Vol. I., 1896, p.29; L.A.Bauer, *Nature*, May 23, 1895.有重大价值的是，哈雷在1686年绘制并在*Philosophical Transactions*（1688, No.183）上发表了最早的《〔磁偏角〕方向图》(wind map)。这张图再版于Hellmann's *Neudrucke*, No.8, Berlin, 1897.

〔2〕 E.Hoppe, *Entw. d. Lehre. v. d. Elektricität bis auf Hauksbee'* Hamburg, 1887, p.18.

〔3〕 *Boyle's Works*, by Peter Shaw, 2d ed., London, 1738, Vol. I., p.506. et seq.; E.Hoppe, 同上, p.17.

讶。“把玻璃杯用粗糙的擦布轻快地摩擦一回儿，直到放在桌面上低于玻璃杯的极小的薄纸碎片开始被吸引，并敏捷地往复运动……，跳到玻璃杯上并暂时停止在那；然后跳下去并静止在桌面上；而后又跳上去或跳上跳下。”[1]

马德堡的盖里克以他的手按着转动的硫磺球而产生电。这个闻名的发明是摩擦电机的先驱。他发现了电感应并做了其它一些有趣的观察，但他关于电的思辨——他的“宇宙力”（mundane virtues）——就象吉尔伯特的宇宙学的磁性理论一样的不幸。

波意耳做的一个重要实验表明，电的吸引通过真空也能发生。让·皮卡特在1676年一个傍晚带上一个水银气压计从巴黎天文台到圣迈克耳港（Porte Saint Michel），他看到水银的每一次晃动都在托里拆利真空内产生辉光。这个发光的原因被认为是由于一种称为水银磷的物质引起的。这名称是以磷的一种新的辉光观象（磷光）而提出的，因此它使科学界感到震惊。皮卡特辉光的起源在英国被豪克斯比研究过。他让空气从上部冲进真空中，通过玻璃管〔把空气〕浸入钟状玻璃瓶下的水银盆里，并观察空气把水银吹起，“这空气猛烈地冲击着含有水银的玻璃杯边，四周都显出一种好象发亮的物体，形成了许多辉光的小珠，并又掉进水银里。”[2]从这个和其它的水银试验中，豪克斯比推断，辉光不会在没有运动和没有部分真空的情形下得到。他观察到伴随这现象的吸引，并断言光是由于电产生的。他首先证明，电荷仅停留在物体的表面；并且证明，金属也可以用摩擦起电。

〔1〕 T·Birch, *Hist. of Royal Society*, Vol. Ⅲ., London, 1757, p·250. E. Hoppe, 同上页注〔2〕p·14

〔2〕 *Phil. Trans.*, 1705, No. 303, p·2129; Hoppe, 同101页注〔2〕, p·21·

声　学

振动的弦线是伽利略和默森研究的课题。伽利略指出，音调取决于单位时间内所听到的振动数。默森谈到，弦线除了基音以外，还产生二种泛音。在牛津，W·诺布尔和T·皮戈特以放在振动线上不同地方的纸游码证明，弦线不仅作总体的振动，而且还有1/2、1/3等等的振动。[1]默森以在已知距离内的火枪的声音和闪光之间的时间差测定了声音在空气中的速度。他得到的声速是每秒1380呎。伽桑狄（1592—1655）用了火炮以及手枪〔测定声速〕，他证明逍遥学派关于声速取决于它的声源和它的音调的教义是错误的。他测定的〔声速〕是每秒1473巴黎尺。巴黎科学院的杰出成员D 卡西尼、让·皮卡特、勒麦和惠更斯发现声速为每秒1172巴黎尺。

牛顿在他的《原理》（第二卷、命题 XLVIII、XLIX；L）中对声速作了理论推导，他断定，这个速度正比于“弹性力”的平方根，反比于“介质密度”的平方根；它“等于以等加速度下落运动的物体在它们下落高度A的一半所表示的速度”，这里，A是均匀大气的高度，取作29,725呎。这给出了声速为979呎，而实验证明是约1142呎。牛顿推测了实验值和理论值之间不一致 105 的原因，但是，真正的解释是在过了一个世纪之后由拉普拉斯（1749—1827）做的。牛顿没有考虑到由于压缩变热和稀疏致冷引起的弹性变化。他的表示式为$U=\sqrt{\frac{p}{d}}$；而拉普拉斯的修正式为$U=\sqrt{\frac{1.41p}{d}}$，其中p是大气压，d是空气密度。

〔1〕 *Phil.Trans.*,1677; Heller.Vol Ⅱ.,p.339.

106

十 八 世 纪

在十七世纪前80年间物理学的进展确实是不寻常的。在人类历史的较早的一些时代，人们看不到象这样的情形；在十八世纪期间也没有出现这样的情况。伽利略、盖里克、波意耳和牛顿的名字使这个认为实验居于至高无上地位的这一时期大为生色。在十八世纪，出现了相反的情形。整个说来，思辨实际上很少受实验的限制和支配。

另一个重要的原因使这个世纪较少光彩。它很少产生伟大的实验物理学家——没有象伽利略、惠更斯和牛顿这样的卓越天才。数学和数理天文学在十八世纪由于伯努利、欧拉、克来罗、达朗贝尔、拉格朗日、拉普拉斯等人的重要研究而丰富起来，但是物理学领域本身却是由能力有限的人来耕耘的。

十八世纪是以科学的唯物论时代为特征的。那时，人们还不知道能量的概念。力是物质的性质。这个世纪企图以假定"不可秤量物"的存在来解释物理学和化学中的隐秘现象，所谓"不可称量物"是很难于捉摸的、稀薄的、不能秤量出来的物质形式。这个术语用来与普通的或可秤量物质相区分。十八世纪大约有七种这样的物质，其中三种是从十七世纪和更早的世纪继承下来的。它们也不总是被假定为没有重量。在这方面，在许多不同的作者中存在有相当大的差异。

最老的不可秤量物质是热质，即叫做热的质料。虽然"热质"这个名称是比较近的时候产生的，但它可以追溯到罗马和希腊的时候；这一词是化学家拉瓦锡在他的1789年发表的《论化学元素》中采用的。十七世纪时许多科学领导人都把热看成是运动的形

107

式。正是在十八世纪，许多科学家的心目中固守着热是一种物质，并且一直坚持到将近十九世纪中叶。

笛卡儿在1644年假定，在星际空间充满着物质，并且它们在很大的漩涡中运动，在欧洲大陆上人们的思想中直到近十八世纪中叶还保持着它的地位。这种物质是不可秤量的，而且在形式上是球状的。笛卡儿还假定了两种不可秤量的物质形式，即太阳的发光物质和地球的不透明物质。[1]

正如我们已经知道的，惠更斯和胡克，还有牛顿都假定有发光的以太存在。在十八世纪时只有很少的科学家感到需要这种物质。另一方面，牛顿的光的发射说的微粒是不可少的。在笛卡儿的漩涡绝迹以后，除了这些飞行的粒子外，在这个世纪里星际空间是空虚的。

十八世纪初，巴伐利亚（Bavarian）的化学家G.E.施塔耳亲自目击了有名的燃素说的创立。他从他的老师贝歇尔那里吸收了这个学说的初步思想。这是企图解释现在称为氧化的现象。燃素说保持它的地位直到拉瓦锡在1789年前后推翻它时为止。当煅烧或氧化物体和金属时，施塔耳就把从它们那里逃脱出来的东西称为燃素。他是否认为燃素是可秤量的还是不可秤量的，这一点表现得不明显；他以为它可能是可秤量的。在施塔耳看来，金属的氧化是一种分解过程。他把金属中排出的燃素看作是一种化合物，遗留下来的是更原始的土。施塔耳和许多同时代的化学家很少使用天平。否则，他们将被如下的事实所困扰，即木头放出燃素后留下的灰烬其重量比木头轻，而金属放出燃素后留下的残渣比原来的金属重。燃素说和热质说有时彼此冲突地出现。金属氧化时重量的增加被一些作者藉助可秤量的热质解释为合成过程而 108

[1] 见E.T.Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity from the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century*. London, 1910.

不是分解过程。热质在这过程中进入了物质。在拉瓦锡推翻了燃素说以后，没有可以和热质相匹敌的东西，它高居统治地位中约半个世纪之久。

在电方面，我们将要看到，杜费和西默感到需要假定两种不可秤量的流质，而富兰克林主张只要一种。富兰克林假定电在结构上是颗粒状的，这和现代的概念是和谐的。磁也被一些人解释为由于不可秤量的流作用的结果。欧拉用了单磁流，而库伦用了双磁流。它们肯定是非常细微，才能够通过玻璃并对〔玻璃〕另一面的磁针发生作用。十八世纪真是一个唯物的世纪。

力　学

正如牛顿所说的一样，力学原理足以解释任何一种无论是静力学或者动力学中的日常的实际问题。可是，人们发现，推导出一些特殊的定律，用这些定律就可以按常规来处理某类问题。我们引用“达朗贝尔原理”、“动量守恒”定律、“重心守恒”定律、“面积守恒”定律作为例证。十八世纪对这些原理的发展作出了很大贡献，以致能以新的观点看待力学现象。但是，它们的内容以及力学的分析发展是本书范围以外的东西。[1]

109

应当指出，阿脱武德(1746—1807)为研究落体定律发明了新的装置。伽利略用倾斜槽减慢落体的速度，因此实验更为容易。阿脱武德则以一根绕过很容易转动的滑车的线吊起两个重物来达到这个目的。阿脱武德是剑桥三一学院评议会会员和导师，他在那里发表的关于实验哲学的一些公开讲演，不论是在讲演的流畅

〔1〕 读者可参阅 E.Mach.*The Science of Mechanics*, trans.by T.J.McCormack.Chicago,1893;E.Dühring.*Krit.Gesch.d.allgem*.Princ.d.Mechanik,Leipzig.1887.

方面，还是在它们的示范实验的巧妙方面都是出色的。[1]他于1784年在他的《论物体的直线运动和转动》的专著中发表了关于阿脱武德机的描述。

光　学

放弃波动说

在十七世纪期间我们看到关于光的两种学说之间的冲突。我们已经看到牛顿怎样从那时已知的事实出发，衡量了赞成和反对每种学说的论点，并踌躇地决定赞成发射说。而在欧洲大陆，他的伟大的同时代人惠更斯却提倡波动说。在兰利于1888年发表的一篇演说中，我们发现了十九世纪对十八世纪科学的观点："当时有两个伟人，他们每个人都在自己的灯光照引下在黑暗中察看。对每一个人来说在灯光以外的一切都是偶然的；并且命运注定了牛顿的灯照耀得比他的对手更远，而且牛顿发觉灯光正好照到足于表明错误道路的入口处。牛顿作出了我们都知道的结论；这个结论不仅对于光是错误的，而且对整个热学理论也产生了有害的结果，因为一旦承认光是物质的，同时如果认为辐射热是光的亲属，那么热必须也看作是物质的；并且牛顿的影响是如此长久，以致于我们将要看到一百年以后赫谢尔的同时代人从赫谢尔 110 的实验中作出了这种奇怪的结论。由此看来，这个不幸的微粒说的影响比我们平常所想象的要更深远得多。"[2]

十八世纪提倡波动说的仅有的杰出的著作家是欧拉（1707—

---

[1] *Dic. Nat. Biog.* 也见 T. Young's *Misc. Works*. Vol. Ⅱ., pp, 617—623.

[2] S. P. Langley, *The History of a Doctrine*, 1888, p. 4, 发表在A. A. A. S.的克利夫兰(Kleveland)会议集中。

1783）[1]和富兰克林。他们在表示赞成波动说时只提出了理论上的考虑，而且不确信任何一种学说。欧拉在 1750 年出版了他的《致日耳曼公主关于物理学中几个问题的信》。这本著作的德文译者认为这本著作需要添加一些解释，以免可能导致一些天真的读者相信这个至今（1792年）尚未受到“一个杰出的物理学家支持”[2]的学说。欧拉以振动持续时间的不同解释颜色的差别。他推测眼睛的不同媒质具有防止色散的性质，并建议以两种不同的物质来制备透镜，以便消除色差。对于如何作到这一点，他有一个理论，但实际上不能制成一个消除色差的透镜。他把这个失败归因于精确设计方面的困难。

消色差透镜的发明

欧拉的思辨引起了乌普萨拉(Uppsala)的教授克林根施蒂纳的好奇心，他开始重复牛顿的消色差实验，并且得到了不同于牛顿的结果。在这时期，伦敦的光学仪器商J.多朗德开始做了一系列实验。这些实验的结果也跟牛顿的相反。于是，多朗德检测了不同的玻璃，并于1757年写信给克林根施蒂纳，他在信中指出，入射角的正弦和平均折射角的正弦之比对冕牌玻璃为1.53，对火石玻璃为1.584。[3]因此，他断定，消色差在透镜中肯定是有可能的。事实证明，要在实践上实现这个理想是困难的，并且需要有(用自己的话说)“不屈不挠的精神。”[4]最后他在1758年成功了，并将消色差望远镜送交皇家学会。这个创造轰动了整个欧洲。多朗德的成功似乎否定了欧拉的色散理论，并且使他感到很窘。

---

〔1〕 论文发表在*Memoiren der Berliner Akademie*, 1746, 1752.

〔2〕 Rosenberger, *I. Newton u. s. Physik. Princ.*, 1895, p.332.

〔3〕 H. Servus, *Geschichte des Fernrohrs*, 1886, p.83.

〔4〕 参阅*Phil. Trans.* Vol.50, 1758, p.733.

在多朗德死后，于1761年他的儿子P·多朗德（和机械师冉斯登合作）制成了具有很高价值的折射望远镜。经过反复的失败之后，消色差透镜开始被成功地应用到显微镜上。

消色差望远镜大大地促进了现代天文学的发展。当我们回想起惠更斯利用了很大焦距的透镜，从而制造了非常长的无管折射望远镜（把物镜安放在高竿上），以此消除色差效应时，〔消色差望远镜〕有多么大的优越性就更为明显了。惠更斯的无管折射望远镜是非常粗陋的，同时产生的光学效果很差。他赠送给皇家学会的一个物镜的焦距长是123呎。

当P.多朗德的望远镜已经闻名之时，另一个人的主张公之于众了。早在1729年，在埃塞克斯(Essex)的M.霍尔(More Hall)的C.M.霍尔，当研究人眼的机制时曾导致他设计无色透镜。他雇用了几个光学仪器工人来磨制他的透镜，并作成了几个物镜。但是，他从来没有发表他的工作的任何说明。多朗德的工作是不依赖于霍尔而独立完成的。[1]

反射望远镜和折射望远镜的竞争

112

大型反射望远镜的建造和消色差望远镜的初期发展是同一个时期发生的。英国人又显示了高等的技巧。在1723年，约在牛顿做成他的反射望远镜以后半个世纪，哈德利送给皇家学会一个6呎长的反射望远镜。它和惠更斯制造的123呎长的折射望远镜等效！爱丁堡(Edinburgh)的肖特、特别是赫谢尔(1738—1822)进一步发展了凹面镜的设计。为了改进“空间贯穿本领”，赫谢尔

〔1〕 D.Brewster, *Life of Sir I.Newton*, New York, 1831, pp.64—67. 关于霍尔和消色差性质的更详细的论述，参阅*Encyclop(a)edia Britannica* (9th ed.)中的“Telescope”一词，以及*Edinburgh Encyclop(a)edia*中的“Optics”一词，p.607，注解。

以更大的镜面来增加光的聚光本领。他以空前的热诚和技巧在凹面镜的成型和磨光方面进行了实验。他作成了焦距为10、20、30呎和最后一个为40呎的凹面镜。最后，在1789年完成了直径为4呎、重量为2500磅的望远镜，这个望远镜使赫谢尔发现了最靠近土星光环的两个卫星。爱尔兰帕森斯城(Parsonstown)的罗斯勋爵在1745年做成了一个巨大的反射望远镜，它的镜子的横断面为6呎长，镜筒长58呎，镜面直径7呎。它的筒管这么大，以致皮科克院长有一次高举着雨伞从它里面走过。[1]这个“捕光物”非常明亮地显现出天体。詹姆斯·索斯爵士高喊：“在我的一生中我从来没有见过这样明亮的恒星图!”这是在二十世纪之前建成的最大的反射望远镜。新近的更好的反射望远镜是加利福尼亚的利克天文台上的克罗斯利(Crossleg)和米尔斯(Mills)反射望远镜；在加拿大的多米尼恩(Dominion)天文台最大的72吋的反射望远镜，以及在加利福尼亚的威尔逊山天文台100吋的胡克反射望远镜。G.E.赫耳说，[2]望远镜的镜片用镀银的玻璃胜过金属，

113 “主要是由于这样的玻璃具有能被磋磨和磨光的优点，并且当它褪色时容易更新它的镀银的表面。”纯银薄层必须是“一年重新镀几次并总是保持高度的光泽。”赫耳进而补充道：“追溯折射望远镜和反射望远镜之间为霸权所进行的长期竞争是很有意思的，它们中的每一种在它的发展的一定阶段上都表现出是无与伦比的。在现代的天文台中，两种型式的望远镜都使用，为了一定的目的，每一种都有它最适用之处。对星云进行照相和研究较暗

---

〔1〕 A.M.Clerke, *A Popular History of Astronomy*, New York,1893,pp.145,147.

〔2〕 George Ellery Hale, *The New Heavens*, New York, 1922,p.16

淡的星，反射望远镜具有特别的长处。”[1]

热　学

阿蒙顿的空气温度计

阿蒙顿(1663—1705)在1702年改进了伽利略的空气温度计。阿蒙顿在年轻时变成聋子，但他没有把这看成是不幸，因为这使他有可能从事科学研究，而较少受外部世界的干扰。他在巴黎政府中任职。他的空气温度计具有恒定的体积，并由一个U形管组成，这个管的较短的一臂接在玻璃球上，较长的一臂有45吋长。温度的度数是以较长的一臂里的水银柱的高度（以吋为单位）来表示的，这较长的臂需要保持恒定的体积。这个仪器被当作一个标准，通过它，比方说，巴黎的一个水银温度计能跟圣彼得堡的一个温度计作比较而不需要把温度计从一个地方送到另一个地方。但是，这个发明得到赞赏不多。他选择水的沸点作为一个固定点，但是，由于不知道水的沸点取决于大气压力，因此，他不能得到非常大的准确度。[2]有趣的事实是，阿蒙顿的研究就是现

114

---

〔1〕 关于望远镜史可进一步参阅 C.S.Hastings, *Smithsonian Report*, 1892；也见 George E.Hale, “On the Comparative Value of Refracting and Reflecting Telescopes for Astrophysical Investigations”, ***Astrophysical Journal***, Vol.V., 1897, pp.119—131. 对十六和十七世纪期间失真像的历史感兴趣的读者可参阅 H.Ruoss, “Geschichte der optischen und katoptrischen anamorphosen”, ***Zeitsch. d.Math. u.Phys.***, Vol.39, 1894, His.Lit.Abth., p.1.

〔2〕 E.Gerland, “Ueber Amontons'und Lambert's Verdienste um die Thermometrie”, ***Zeitsch. f. Instrumentenkunde***, Vol.VIII., 1888, pp.319—322. 该文摘要见 ***Poske's Zeitschrift***, Vol.II.1899, pp.142, 143.

在用查理和盖——吕萨克的名字命名的气体定律的实验证据，并且他第一次得到了绝对温度的概念。他说："看来，这个温度计的极冷点是通过空气的弹力使空气变成为完全不受负荷的状态，在这状态下冷的程度比认为的很冷的那个温度要冷得多。"从阿蒙顿的资料中，在我们的摄氏温标中绝对零度是-239.5°。以更大的准确性重复了阿蒙顿实验的兰伯特得到了绝对零度是-270.3°。[1] 现在被接受的值是-273.1°。兰伯说了这样的话："现在等于零的热的程度确实可以称之为绝对的冷。因为在绝对冷时空气的体积是零，或者是相当于零。这就是说，在绝对冷时，空气是如此紧密地挤在一起，以致它的各部分绝对地接触，或者说它变成为所谓不透水的东西了。"

华伦海特温度计

受到阿蒙顿研究的激励，**华伦海特**(1686—1736)开始研究温度计的精确结构。他出生在但泽(Danzig)，但到阿姆斯特丹接受商业教育；他变得对物理学很感兴趣，并曾在英国、丹麦和瑞典旅行。他是一个气象仪器的制造者。从他在1724年被选到伦敦皇家学会，说明他显然因此获得了相当大的声誉。同一年，他投寄给《哲学会报》五篇用拉丁文写的短文。其中他第一次揭示了他制作温度计的过程。[2]华伦海特曾跟勒麦通信，他可能在哥本哈根访问过勒麦。在1709年的寒冬季节，据说，这两个人在作温度记录。

华伦海特对阿蒙顿关于沸点的恒定性的观察（在这之前惠更

[1] Lambert, *Pyrometrie*, Berlin, 1779, p.29; E.Gerland, *Instrumentenkunde*, Vol.VIII., p.322.

[2] 这五篇论文与勒奥默和摄尔萨斯论温度的论文一起被译成德文-德译文在 *Ostwald's Klassiker*, No.57. Leipzig, 1894.

斯、牛顿和哈雷也作过观察）很感兴趣。由于想知道其它的液体如何行为的好奇心，他做了一系列实验，并且发现每一种液体都象水一样有一个固定的沸点。[1]后来他注意到沸点是随大气压的变化而变化。[2]注意到这件事实对精密的计温学是很大的贡献。华伦海特应当得到很大的荣誉，因为他第一次提出了在温度计中普遍使用水银。（应当记得，最早在玻璃管里装上水银的温度计是由布利奥在1659年作成的）华伦海特水银温度计的成功主要是由于他发明了净化水银的方法。

华伦海特作了两种温度计——一种装上酒精，另一种装上水银。从他在1724年发表的第一篇论文看来，他那时所用的温度计选用了两个固定点：结冰的盐水混合物的温度和人体的血液的温度，并把它们之间的间隔分为96度。从他1724年发表的第二篇论文看来，他还使用了以冰水混合物决定的第三个固定点。我们从这篇论文中引述如下："那些温度计的刻度仅仅是使用在始于0度和止于96度的气象观察而已。这个刻度取决于三个固定点的测定，它们是用如下方法得的：首先，最低点……是以冰、水和氯化铵或海盐的混合物来确定的，如果把温度计浸在这混合物中，则〔温度计内〕液体降落到记为零的点。这个试验在冬天比在夏天更成功。第二点是这样得到的，如果混合物是由水和冰混合而成，但没有刚才所说的盐；如果把温度计浸在这种混合物中，则温度将固定在32度……；第三点是在第96度，如果温度计是放入健康人的口中或腋下，酒精就膨胀到这一点。"[3]

116

在他的第五篇论文中，他说："在我解释关于一些液体的沸

---

〔1〕 *Phil.Trans.*, Vol.30, 1724, pp.1—3; *Ostwald's Klass.*, No.57, P.5.

〔2〕 *Phil.Trans.*, Vol.33, pp.179, 180, *Ostwald's Klass.*, No.57, P.17.

〔3〕 *Ostwald's Klassiker*, No.57, pp.6, 7.

点的实验中，我曾讲过那时发现水的沸点是212°；后来我通过种种观察和实验，认识到这一点对于同一种水和在相同的大气重量下是固定的，但在不同的大气重量下它可能很不相同。”由此可见，在1724年的212度的数字是没有预先安排的；沸水纯粹是碰巧使水银柱升高到那一点。如果我们对华伦海特的1724年的论文的解释是正确的，那正是同样偶然的原因才把32度记为水的冰点，并把180度固定为水的冰点和沸点之间的度数。我们可以预料，在华伦海特后来的实践中，他利用他的实验结果使他放弃了在他的第一篇论文中叙述到的两个固定点，并选择了水的冰点和沸点的温度作为更加方便的固定点。但是，我们没有直接的和可靠的信息来证明或者是他或者是他的阿姆斯特丹的合作者实际上走了这一步。在他赠送给C.沃尔夫的两个温度计的1714年的《博闻录》中的说明书表明，从结冰的盐水混合物到血液温度之间首先划分为24份，然后把这24份的每一份再更细地分为4份，全部就是96等分。

当华伦海特的温度计被荷兰和英国人采用时，其它国家却迟迟看不到它们的价值。在法国勒奥默设计了温度计。勒奥默（1683—1757）因他在动物学、植物学和物理学上的研究而闻名。但他不熟悉华伦海特的成就。由于不满意阿蒙顿的空气温度计（但勒奥默仍然认为是唯一适用的温度计），又由于水银的膨胀系数小，勒奥默强烈地反对使用水银，他致力于制造一个既方便又能达到精确度要求的酒精温度计。他的实验偶然地使他很好地观察到液体体积的收缩，这可能是由于几种液体混合的结果。[1]他发现酒精（和1/5的水混合）在水的结冰温度和沸腾温度之间的膨胀是从1000个单位体积到1080个单位体积；因此他把玻璃管的结冰和沸腾点之间的距离分为80份。但是，勒奥默的温

117

〔1〕 *Ostwald's Klassiker*, No.57, pp.100—116,127. 勒奥默的关于温度计的三篇文章的德文译文发表在第19—116页。

度计结果不好。各种各样的难于置信的读数都显示出来了，并且不同的温度计也不一致。日内瓦的德吕斯（1727—1817）恢复使用水银，并以如此有力的论据强调了它的优越性，一个物理学家热情地呼喊道："自然界给我们这个矿物肯定是为了做温度计。"[1]

另一方面，日内瓦的另一个科学家克利斯特除了校准毛细管以外并未采用水银。他和在圣彼得堡的德伊斯尔大约同时采用这种方法。[2]克利斯特抛弃以结冰的水的温度作为一个固定点，而选择了在巴黎天文台的84呎深的地下室所测定的大地的温度作为一个固定点。这并不是他提出的一种新思想。波意耳和其它人已提到很深的地下室里的恒温。克利斯特把这温度和沸点之间分为100刻，因此得到了和勒奥默的温度计非常一致的分刻度。他的部分物理学研究是在他因政治而被囚禁的20年期间进行的。

百度温标的采用

118

在克利斯特以后，百分温标被植物学家林耐、天文学家摄尔萨斯和施勒默尔采用，他们都是乌普萨拉人。林耐在他的《自然系统》（阿姆斯特丹，1737）一书的用镌版印的扉页上画出了一种温度计，以管子的中央记为1，在此上下都分刻度，直到100。摄尔萨斯在1742年记沸点为0°，记冰点为100°。[3]把这标度倒转过来，以冰点为0°，是八年以后由摄尔萨斯的同事M.施勒默尔采

〔1〕 Deluc, *Recherches sur les Modifications de l'Atmosphère*, Genève, 1172, p.330. E.Gerland, 同111页注〔2〕p.20.

〔2〕 J.H.Graf, *Das Leben und Wirken des Physikers und Geodäten Jacques Barthélemy Micheli du Crest*, Bern, 1890, p.114.

〔3〕 *Abhandl.d.Schwedisch Akademie*, Vol.Ⅳ., pp.197—205; 译文见 *Ostwald's Klassiker*, No.57, pp.117—124.

用的．因此，我们现在的百分温标的最后形式不是摄尔萨斯而是施勒默尔创制的。[1]

十八世纪时，实际使用的各种温标大大地增加了。马廷在1740年提到它们的13种；兰伯在1779年列举了 19 种。[2]除了 他们中的 三种外，统统都被遗忘了。 百度温标是唯一的幸存者！ 在英国、美国，华氏温标占优势。在德国是勒奥默温标，在法国是摄氏温标占优势。在科学界几乎普遍采用摄氏温标。

最早的依靠金属细竿的膨胀和收缩的温度计大约是在1747年由莱顿的穆欣布罗克发明的。德扎古利埃对它作了改进。大约35年以后韦奇伍德的高温计才出现，[3]这高温计是从纯粹的耐火土中制备的，土块的大小在某些方向的缩减 作 为 量 度 熔 炉 的 高温。[4]

蒸汽机的早期发展

在1705年，人们已经作出了蒸汽动力的实际应用的第一个重要设计。在希龙的原始小涡轮以后（见第 8 页）1000多年以来，

〔1〕 此外，的确还要把倒转标度的荣誉给予里昂的教授克里斯廷，见 *Poggendorff's Annalen*, Vol.157,1876, p.352. 摄尔萨斯和施勒默尔在改进他们的温度计方面可能受到植物学家林耐 的 提醒，林耐有一次在一封信中写道：“我是第一个计划作这样的温度计，在那里 0° 是冰点，100° 是沸水的温度。” *Comptes Rendus*, Vol.18,p.1063. 应当想到，惠更斯最早建议用这些温度作为固定点。

〔2〕 G.Martine, *Essags medical anb philosophical*, London, 1740; Lambert, *Pyrometrie*, Berlin, 1779.

〔3〕 *Phil.Trans.*, Vol.72,1782; Vol.74,1784.

〔4〕 G.T.Halloway, “The Evolution of the Thermometer”, *Science Pregress*, Vol. Ⅳ., 1895—1896, p.417.

〔蒸汽的使用〕没有进展。在十七世纪期间人们曾设计过蒸汽喷泉装置，但它们纯属修改了的希龙发动机，而且大概只为了装饰的目的才使用它。[1]莫尔兰、巴本和赛维里对于建造用于提水或推磨的实用的机器也作了一些努力。第一次将当时已知的机构的原理和形式结合成为一个经济适用的机器的成功尝试是英国达特默思（Dartmouth）的铁匠纽科门作的。有可能他知道赛维里的机器；赛维里和纽科门的住地相距仅15哩。纽科门在卡利的协助下，建造了一种发动机——“大气蒸汽机”。这项发明在1705年获得了一个专利。在1711年，这样的机器被安装在沃尔弗汉普顿（Wolverhampton）作提水用。从锅炉进入到汽缸的蒸汽对抗外部大气压力使活塞向上移动，直到汽缸和锅炉之间的通路被一个开关卡住为止。然后，在汽缸中的蒸汽被喷水流凝聚。从而形成部分真空，而上面的空气迫使活塞向下移动。这个活塞联结在架空连杆的一端，连杆的另一端携带着水泵杆。德扎古里埃讲了这样一个故事：一个叫汉弗莱·波特尔的孩子负责在每一个冲程中开关锅炉和汽缸之间的活塞，他用挡器和绳索使这个塞子自动运动。[2]1736年赫尔斯采用了飞轮。苏格兰的**瓦特**（1736—1819）作了第二个重大的改进。他被培养成一个数学仪器制造者。在1760年他在格拉斯哥开设一个工场。在对蒸汽机和它的历史发生兴趣之时，他开始以科学的方式进行实验。他进修化学，并由“潜热”的发现者布拉克博士辅导他学习。[3]在观察到纽科门蒸汽机中热的大量损耗是由于汽缸在每一冲程中受到喷水冷却的缘故，他开始考虑如何保持汽缸“总是象刚进入的蒸汽那么热”的方法。他告诉我们，他最终如何想到了达到这个目的的美好思 120

〔1〕 R.H.Thurston, *A History of the Gronth of the Steam-engine*.New York,1893,p.20

〔2〕 Thurston,同上，p.61.

〔3〕 Thurston，同上，p.83. 在那时和一段长时间之后，热的研究是在化学中而不是在物理学中进行的。

想：“我在一个晴朗的休息日下午出去散步。我进入到夏洛特街(Charlotte street)头城门旁的草地，并经过老洗衣房。这时我正在思考蒸汽机，并且一直走到了牧人的房子旁，当时一种思想涌进我的脑海，蒸汽好象是一种弹性体，它会冲进真空中，如果在汽缸和排汽容器之间做成一个联络装置，则蒸汽将冲进排汽容器，蒸汽可以在这里冷凝而不会冷却汽缸。”[1]这样活塞是以蒸汽的膨胀来移动的，而不是象纽科门的蒸汽机一样以空气的压力来推动。瓦特采用了一个隔离冷凝器，一个蒸汽套和其它的改进装置。他在参与发展蒸汽机的那些人物中应当占有突出的地位。

热的热质说

在上一世纪期间，权威的科学家们或多或少明确地讲过，热是由于分子的运动。但是，这个正确的观念在偏爱唯物论的十八世纪中最终被抛弃了。在这里，我们很好地说明了一个事实，科 121 学的道路不总是一直向前的——不总是象军队朝向某个确定的目的地前进一样。兰利说：“我相信，科学的进展跟听从一个首脑命令的军队的进军作比较时，其中的错误比真理更多；尽管所有的比喻多少带有错误的成份，但我还是倾向于请你设想一群运动着的群众为好，在这里，整体的方向是从它的各个人的独立的动向中以某种方式产生的；多少也有点象一群猎犬，或许最后是捕捉住它们的猎物，然而当它们在哪里闻失了追踪的猎物，每只猎犬就各自依嗅觉而不是依视觉走它自己的路，有些猎犬往回跑，而有些犬向前跑；而一些嗓门较大的猎犬常常使许多猎犬跟它们跑，它们几乎经常走上歧途，就像经常走上正道一样；人们还知道甚至有整群猎犬由于一个假的嗅迹而统统离开正道的。”[2]

---

〔1〕Thurston，同上，p. 87.

〔2〕S.P.Langley，同107页注〔2〕p. 2.

认为热是物质的这种学说的最早的渊源可在古希腊的德谟克里特和伊壁鸠鲁以及卢克莱修的著作中找到。在近代，它又受到伽桑狄(1592—1655)的支持，他曾经有一个时期是巴黎皇家学院的数学教授。他是一个有才能的人，但在物理学上他的工作与其说是实验性的不如说是思辨性的。[1]承认热是一种物质因的学说，由于早先哈雷大学的教授施塔耳(1660—1734)引入关于燃烧的错误学说而得到促进，按照施塔耳的学说，燃烧着的物体放出一种称为“燃素”的物质。一种这样的物质因为另一种物质因铺平了道路。在1738年法国科学院设置了回答热的本性问题的奖状。得奖者（欧拉是三个得奖人之一）倾向于唯物的理论。[2]起初假定这种叫做热的物质因的仅有的一些性质是它具有高度弹性以及它的微粒彼此排斥。用这种排斥能解释热物体放出热这一事实。后来，人们假定，热的微粒吸引普通物质，并假定分布在物体中的这个热在数量上是正比于物体与热微粒的相互吸引力（或者物体的热容量）。直到十八世纪末，人们几乎普遍地接受了这个学说。后来因为法国革命的领导人而闻名的马拉，在1780年从牛顿的光的微粒说开始，对这个理论作了说明。热质说首先受到美国人伦福德的猛烈攻击，但是迟到1856年，在《英国大百科全书》（第8页）“热”这一词条中，对热质说的偏爱胜过〔热的〕动力学理论。

122

热的最早量度

尽管理论是错误的，人们还是发现了关于热的某些新事实。布拉克发现了他所谓的“潜热”和“热容量”（比热）。布拉克

〔1〕 G.Berthold, *Rumford und d. Mech. Wärmetheorie*, Heidelberg, 1875. pp. 2—5.

〔2〕 Berthold, 同上, p. 6.

(1728—1799)出生于波尔多(Bordeaux)。他的父亲生于贝尔法斯特(Belfast)，是作为一个酒商在波尔多定居的。布拉克是格拉斯哥的教授，1766年以后是爱丁堡的教授。他是气体化学的一个很闻名的创造人。

在1756年，他开始思考冰的溶解和水在沸腾时的消散的令人不解的缓慢。他最后断定，大量的热仅仅消耗在实现这些状态的变化方面，而温度甚至于没有丝毫的改变，这种〔热的〕散失的原因是在物质的微粒和称为热的细流之间的准化学组合。按照他的观点，这种热是“潜在的”；按现代的观点，没有什么“潜热”，而是发生了能量转换，热这种形式的能转变为给予物质粒子的势能。现在的学生们不必为他们没有立刻得到水的汽化热的精确的数值而感到沮丧。闻名的布拉克和他的学生威廉·欧文得到水的汽化热为 417；后来得到另一个值为 450；而正确的数值（在标准大气压下）是 536。他以混合物的方法得到的溶解热是77.8，更为精确的值是 80.03（这是由本生得到的）。

123

当布拉克在世时他的关于热的伟大发现一直未发表，但在1761年以后他在他的讲演中解释了那些发现，他以严肃的辩论对自然界的仰止或调节过程中的“排列的亲和效应”作过详细的探讨。[1] 他的发现不仅为量热学奠定了基础，而且成为瓦特改进蒸汽机最初的动力。

布拉克讨嫌公布作者身分，他没有为他自己的优先权辩护。正如可以预料到的一样，其它人也曾提出同样的观念。巴黎的德吕斯和瑞典的维尔克在同一方向上作过工作。

在法国革命期间被斩首的伟大化学家拉瓦锡(1743—1794)可以看作是布拉克的弟子。拉瓦锡和拉普拉斯（1749—1827）相协作，约在1783年测定了一些物质的比热。他们设计了现在称为拉普拉斯冰量热器的仪器，但在他们之前，布拉克和维尔克已使用

---

〔1〕 *Dic. Nat. Biog.*

过冰量热器的方法。[1]

电 和 磁

电火花、莱顿瓶的发明

在十八世纪期间，没有一个物理学分支能象电学一样如此成功地得到发展。直到约在1790年开始研究流电之前，电的研究只限在静电学方面。

斯蒂芬·格雷（？—1736）是英国卡儿特养老院领取年金过活的人，他发现了电传导性的区别不取决于物体的颜色或一些类似的性质，而取决于构成物体的物质。这样，金属丝能导电；蚕丝不能导电。他证明了人体是导体，而且是第一个使人带电的人（1730年）。把一个孩子用丝制绳索吊在空中。然后格雷观察到导体会被垫在它们下面的树脂块绝缘。 124

在法国，格雷的实验吸引了**杜费**(1698—1739)的注意，杜费受过军人教育，但在他成年时期，他致力于科学研究。实验使他作出预料不到的结论：所有的物体都可以带电；换句话说，所有的物体都具有长期以来认为是琥珀所特有的性质。因此，人们发现，把物体分为（吉尔伯特采用的）“带电体”（能够以摩擦起电）和“不带电体”（不能以摩擦起电）实际上是没有根据的。杜费注意到了火焰放电力。他以格雷所讲过的方式把自己用丝绳吊起，他观察到，当他带电以及另外一个人接近他时，就从他自己身上射出刺人的流，同时发出噼啪的响声。在黑暗中这些流形

---

〔1〕 拉瓦锡和拉普拉斯合作的论文发表在*Mémoires de l'Académie*, 1780, *p*. 355（实际上是在这时以后三年或四年才出版）。这些论文的德文译本再版于*Ostwald's Klassiker*, No. 40。有关维尔克的内容是在这再版本的第2页。

成这么多火花。“诺莱说，他永远忘不了第一次从受激后的杜费先生和他自己身上发出的电火花所引起的惊讶。”[1]

杜费发现有两种电，他把它们称为玻璃电和松香电。后来，费城的金尼尔斯利独立地作了同样的观察。为解释电的吸引和排斥现象，杜费假设存在两种流，能以摩擦把它们分开，并且当它们结合时又彼此中和。这是在关于电现象的理论方面的最早的重大尝试。它作为富兰克林的单流说的对手由英国人西默作了更充分的推敲。

125

在这时候，人们对完善摩擦起电的机械赋予相当大的注意。直到最后霍尔兹和推普勒感应起电机代替它以前，它在实验里有极端的重要性。埃尔富特(Erfurt)的戈登以玻璃圆筒代替豪克斯比的玻璃球。瑞士格里松斯(Grisons)的普兰塔和以后伦敦的光学仪器师冉斯登采用了圆形玻璃板。莱比锡的温克勒制备了一个皮革的摩垫，用弹簧把它压住跳动着的玻璃，来代替压住转动玻璃的干燥手心。在1762年坎顿把锡汞齐加入摩擦垫子得到了更好的效果。[2]

约1745年，电实验变得这样普及，以致在荷兰和德国公开作电实验的表演。许多人为他们自己的娱乐也做电的实验。在这些人当中有冯·克莱斯特（死于1748年），他是玻美拉尼亚地方的卡明(Camin)大教堂的副主教。在1745年，他有一次尽力以传导方法使瓶子充电。当他的一只手拿着装有一个铁钉的小玻璃瓶，并以跟起电机的导体接触使铁钉带电，他观察到铁钉变为带有这么强的电，以致他用另一只手接触它时就觉得他的肩膀和手臂受到一下猛击。在1746年，在荷兰莱顿以类似的方式作出了同样的

---

〔1〕 Priestley, *Hist.of Elect.*, London, 1775, p.47.

〔2〕 关于各种〔起电〕机的设计，见 G.Albrecht, *Gesch.d.Electricität*, 1885, pp.20—30; Priestley, *Hist.of Elect.*, Plates. Ⅳ—VIII.

发现。在那时候的著名的物理学家穆欣布罗克(1692—1761)试图使瓶内的水带电。在试验中，他的一个朋友一手拿着玻璃瓶，而后同时以另一只手把跟水相连的铁丝移到原导体上。他被在他的手臂和胸口的突然一击而震惊。这样，就发现了我们现在所说的“莱顿瓶”。穆欣布罗克重做了这个实验，而后写信告诉勒奥默，“为法兰西王国他不愿再受一次电击。”威滕贝尔格(Wittenberg)的博瑟教授表现了更英勇的情操。他希望他能被电震打死，因为他的死可以给法国科学院的备忘录提供一篇论文。[1] 126

莱顿瓶的发明使电获得更大的名声。在欧洲几乎每一个国家都有一大批人以进行有关电的实验和表演这些实验而获得生计。莱比锡的温克勒证明，冯·克莱斯特在设想人体在莱顿瓶放电中起了重要的作用是错误的。他指出，把〔莱顿瓶〕内接到外部的任何一个导体都能完满地达到这个目的。

穆欣布罗克给勒奥默的信不能制止法国哲学家们的实验。诺莱在他自己身上重复了莱顿瓶的实验，他在法国甚至比穆欣布罗克在荷兰享有更高的荣誉。他当时在国王面前使放电传过了180个看守。后来在巴黎女修道院把卡尔特教团的修士们用铁丝把每两个人之间连结起来形成一个900呎长的队列，当莱顿瓶放电时，整个队列在同一瞬间突然跳起来。严肃的修道士们的这个举动肯定是极为滑稽可笑的。在法国和在别处的实验者以莱顿瓶的放电杀死鸟和其它动物；他们通过横跨江湖的水面，在长距离传递放电；他们以放电使针磁化，并熔化了金属细丝。莱顿瓶的发现被欢呼为科学的一大进展。

在美国的实验

十八世纪的一些最大胆的研究和最深奥的理论很快被遥远的

〔1〕 Pristley, *Hist. of Elect.*, London, 1775, p. 86.

美洲的富兰克林(1706—1790)做了出来。虽然他在年轻时只是一个印刷工的徒弟，但他发展成为一个有非凡才能的人，他的才能127不仅是在政治和外交方面，而且还在物理研究方面表现出来。在他40岁时，他偶然看见来自苏格兰的史宾斯博士在波士顿进行的一些电学实验。对他来说，这是一个新课题。在他回到费城以后，该城市的图书公司从伦敦的一个商人和皇家学会会员柯林孙那里得到了一只玻璃管和怎样在电学实验中利用它的指示。富兰克林的好奇心被激发出来了，他开始研究这个课题，并且也是为他自己做实验。[1]在他于1747年3月28日给柯林孙的第一封信中，他为这个“起电管”表示了谢意，并说：“在以前我做的任何研究中，我从来没有像近来做这个研究那样如此完全地集中我的注意力和花费我的时间。”[2]经常有好奇的探索者到他家里。由富兰克林、金尼尔斯利、霍普金孙以及辛格组成了一个小小的研究团体。在1747年7月11日给柯林孙的第二封信中，富兰克林描述了“尖端物体在吸引和放出电火花方面的奇妙的效应。”这尖端的作用也曾被其它人观察到，但是富兰克林是第一个充分地认识到它的重要性并把它实际应用的人。

在这同一封信中还包括了富兰克林关于电的学说，它比那时的任何其它人提出的学说更完满地解释了电的现象。他假定，“电火是一种普通的元素”，它在所有的物体中存在。如果一个物体得到了比它正常的份量更多的电，它就被称之为带“阳电”；如果一个物体少于它正常份量的电，它就被指定为带“阴电”。这样一来，富兰克林提出单流说来取代杜费的双流说。我们把“阳

---

〔1〕 *Works of Benjamin Franklin*, edited by Jared Sparks, Boston, 1837, Vol. V., pp.173—180；在这第五卷里还有富兰克林论电的有名的信件；还包括了关于富兰克林的发现的各个科学家的通信的一个附录。

〔2〕 *Works*, (Ed. of J. Sparks.) Vol. V., p.181.

电”和“阴电”或“正电”和“负电”的术语归功于他。这个物质说一直保持到法拉第和麦克斯韦尔的时代。富兰克林以此解释莱顿瓶的充电：在〔莱顿瓶〕的一个表层上含有过剩的“流”，即“电火的充实”；而在另一个表层上是一个“相同电火的虚空”，而且〔莱顿瓶〕确实不比它在充电之前包含有更多的电。[1]他用实验证明了“莱顿瓶的全部力量和给出电击的力量是在玻璃瓶本身之内”（第201页）。 128

1748年，富兰克林因为要退出工商业界并把他的全部时间致力于电的实验，出卖了他的印刷所、报纸和年鉴。他以新的仪器武装自己。他的朋友金尼尔斯利证明，莱顿瓶很容易被瓶外通过的电火花起电，就象在它内部的电火花起电一样（第197页）。在1749年，富兰克林在给柯林孙的一封信中讲到，“热天快要来了，那时电的实验就不那么痛快了”，并且他提议用电的宴会来结束这个季节。“准备用电击来杀死我们正餐用的火鸡，并且在电瓶点火之前，用电开关来烤火鸡。”（第211页）但是，在1749年夏天之前，他就开始了关于电的更认真的思考。

闪电是一种电现象

在这时富兰克林首先提出了以电的原理解释闪电的思想。在这之前，人们已经作了关于闪电的性质和电火花相同的推测。格雷、沃尔、诺莱、弗雷克、温克勒都发表过这种观念。[2]富兰克林可能不知道这些推测。尽管这些推测跟那时流行的闪电学说相矛盾，但是它确实成为某些人在作实验检验时的根据。即使关于气体性质的观点不同，但一般地认为雷和闪电是由于爆炸的气体产生的。在1737年，富兰克林认为闪电是由于“一种难以捉摸的硫磺、黄铁矿的易燃的气息，并且自身着了火。”正如已经讲过

〔1〕 Works,(Eb.of J.SparRs.)Vol.V.,p.191

〔2〕 Benjamin,同上，p.575.

的一样，在1749年初夏，他就提出了电学理论，并且设想了一个大胆的试验计划。夏天的炎热未能阻碍他和金尼尔斯利进行实验。在他的笔记中发现了标有1749年11月7日的以下一段文字：“电流跟闪电在这些特性方面是一致的：（1）发光；（2）光的颜色；（3）弯曲的方向；（4）快速运动；（5）被金属传导；（6）在爆发时发出霹雳声或燥声；（7）在水中或冰里存在；（8）辟裂了它所通过的物体；（9）杀死动物；（10）熔化金属；（11）使易燃物着火；（12）含硫磺气味。”当闪电被尖端吸引或放出时会象他的〔莱顿〕瓶中的电流一样吗？“因为它们在各个特殊方面都是一致的，所以在这些特殊方面，我们已经能够把它们作比较，而它们在这方面也一致是不可能的吗？让我们做这个实验看看。”他提出了以尖端作用引下闪电。“在某个高塔顶上或塔顶上，安上一种岗亭（象图16一样），它的大小足以容纳一个人和一条带电凳。让一根铁竿从凳中央升起并经过椅子弯出门外，然后往上竖起20呎或30呎，上端削得很尖。如果凳保持清洁和干燥，一个人站在椅子上，当可能带电和放出电火花的低云掠过时，铁竿就从云中把火引到他身上。”“如果事情是这样的话。通晓这个尖端的力量不是可以给人类用于保护房屋、教堂、船舶等等免除闪电的袭击吗？……”[1]。



图 16

在1750年7月给柯林孙的信中讲了这种思想，这封信被柯林孙提交给皇家学会。皇家学会起初以嘲笑的态度看待这新的思想。这计划似乎是幻想。[2]皇家学会除了发表关于富兰克林的研

〔1〕 *Works*, Vol. V., pp. 236, 237.

〔2〕 三年以后（1753年），富兰克林的研究得到法国部分科学家和法国国王的热情赞扬，皇家学会授与他科布利奖章（Copley Medal）。关于主席的发奖贺词参阅富兰克林的*Works*, Vol. V. pp. 489—504。在1756年富兰克林被选为皇家学会的会员。

究的简短的介绍以外，没有发表任何东西。柯林孙决定出版这些信件，而不作版本说明。在补充出版后来得到的信件时，它们扩充为四开本，并且出了五版。在第一次出版以后十七年，普利斯特列写道："关于电这个问题的著作，还从来没有比这些信在欧洲各地得到更普遍的阅读和赞扬的。几乎没有一种欧洲语言不把这些信件翻译过去，因为即使这样也不足以使人们普遍地知道它们，所以最近又把它们译成为拉丁文。"[1]

在美洲，公众的好奇心更高。金尼尔斯利开始巡回演讲，表演电的实验并赢得了喝采。在纽约、新港和波士顿，这些讲演引起了真正的轰动。"在法努尔大厅为革命的演说家们的激动人心的雄辩而欢呼之前很久，就回荡着他的玻璃瓶和玻璃球形器皿的劈啪声了。"[2]

富兰克林认为，费城的建筑物或附近的小山，它们的高度都不足以使他能够完成岗亭试验。当他为了树立足够高的螺塔装置而用彩票尽力征集金钱时，在法国国王的赞助下，达利巴尔德在靠近巴黎的玛尔利市镇（Marly-la-Ville）成功地进行了实验的新闻传来了。这是怎么做的呢？仅仅用13米（40呎）高的底部绝缘的铁竿，并把它树起在一个小屋内的小桌子上。达利巴尔德训练了一只老信鸽观察阴云。一根插在玻璃瓶内的黄铜丝是准备从铁竿引出火花的。等了几天以后，在1752年5月10日出现了雷雨云。信鸽使黄铜线靠近铁竿，出现了电火花的激烈的劈啪声。火焰和硫磺臭味显然是可怕的。受惊的信鸽丢下铜丝并向它的邻人高喊，意示要送信给村里的牧师。牧师比信鸽勇敢。他开始由他自己作实验并从铁竿上引出火花。他对达利巴尔德报道了他的结果。[3]

131

[1] Priestley, *Hist. of Elect.*, p.154.

[2] Benjamin, 同11页注[2]p.585.

[3] 这个牧师也是达利巴尔德在法国科学院的同事，他的信在富兰克林的Works载出，见Works, Vol. V., 288—293；也见Benjamin, 同11页注[2]p.588.

达利巴尔德写道："富兰克林的思想已不再是猜测，它在这里已变成为事实。"一个星期以后，在巴黎的德洛尔以 32 米（99呎）高的铁竿重复了这个实验。

富兰克林自己没有把在巴黎的实验看作是结论性的。他没有完全相信法国人的铁竿为闪电带电。这铁竿没有伸进云层。一个新的想法掠进他的脑海。为什么不把一个风筝放进云层内部，并用它的细绳引下闪电呢？他放弃了建立岗亭的计划，而准备了一个风筝。后来他在给柯林孙的信中写道："用两根轻的杉木条作成一个小十字架，这两根木条长到能到达一块大而薄的丝绸手帕张平时的四个角；把手帕的角扎在十字架末端，这样你就作成了一个风筝；……一根很尖细的铁丝固定在十字架上的直木条的一端，使铁丝从木条伸出一呎或更多些。贴近手边的捻线的一端，用丝绸带缠上，在丝绸带和捻线相连结的地方，拴上一个钥匙。"[1]他带上这装置，只有他的儿子作陪，平平常常地一起出去了。他使自己躲在一个能避雨的小屋里，并放出了风筝。一块雷云过去了，但仍然没有电的征兆。当他几乎打消了成功的希望时，他突然观察到绳索松开的纤维直立了。这时他把一指节靠近钥匙，就受到一个强烈的电火花。[2] 火花必定给他带来了非同寻常的快乐！他得到了更多的火花；把一个莱顿瓶充了电；电震也产生了，等等。他已证明了闪电是一种电现象。

132 富兰克林说："在1752年 9 月，为要把闪电引进我的房里以便利用它作些实验，我树起了一根铁竿，同时以两个铃在铁竿带电时给我报警。"[3]他然后从若干实验中断定："雷雨云最普通的是处在负电状态，但有时也处在正电状态"（第 304 页）。[4]所以，"在雷击时，绝大多数是大地的电穿进云层，而不是云层

〔1〕 富兰克林的 *Works*, Vol. V., p.295.

〔2〕 同上，p.175.

〔3〕 同上，p.301.

〔4〕 在这之前，坎顿已经讲过大气电的符号是可以改变的。

的电落到大地”（第305页）。

到处都在重复富兰克林的大气电实验，法国的物理学家勒莫尼埃发现大气总是带电的，甚至于当看不到云时也带电。圣彼得堡的里曼在1753年做闪电实验时被雷电打死。一些科学学会发表了关于雷击对他身上各种器官的影响的详细报导。普利斯特列说[1]：“令人敬佩的里曼的光荣牺牲使每个电气学家不会再这样光荣死去了。”

富兰克林的避雷针

富兰克林的用避雷针保护建筑物的建议，在1754年被梅伦(Mähren)的普林迪茨(Prenditz)地方的一个牧师迪维什第一次实现了。在1760年，富兰克林在费城一座大楼上立起了一根避雷针。威廉·沃特森于1762年在英国立起了第一根避雷针。在1782年，在费城约有400根避雷针。起初，一些神学家反对竖立避雷针。他们的论据是：雷和闪电是神的愤怒的表示，干扰它们的破坏力是不敬的。[2]哈佛大学的第一个物理学教授约翰·温思罗普对这种论证作出了常识性的回答：“正如用上帝赐给我们的方法来预防雨、雪和风那些后果那样，预防闪电的后果同样是我们的职责。”[3]

133

不久，经验证明，避雷针不能绝对地预防闪电击。那时，及以后很久，人们把避雷的失败归之于要么是接地不好，要么是由于针端不尖。人们提出了各种各样设计改进。[4]但是，一直到将

〔1〕 *Hist.of Elect.*, p.86.

〔2〕 A.D.White, *Warfare of Science With Theology*, 1896, Vol.I., p.360.

〔3〕 关于约翰·温思罗普的叙述，见 W.J.Youmans, *Pioneers of Science in America*, New York, 1896.

〔4〕 例如，见费城的帕特森(Robert Patterson)的论文，在*Trans. Am.Philos.Society*, Vol.Ⅲ., 1793, pp.122, 321.

近一个世纪以后人们才认识到真正的困难。富兰克林关于避雷针作用的理论是不完备的。我们现在开始了解到，小心地树起的避雷针的失败是由于放电可能是振荡的事实。[1]

1703年荷兰的旅行者从锡兰* 带来了电石。他们观察到它能吸引灼热的泥炭的细灰。爱皮努斯和维尔克考察了它的性质，他们断言，电石因受热而成为带电体，它的两端带着相反符号的电荷。伯格曼在1766年证明，电石产生电不是由于这样的热，而是由于它的各部分之间的温差，在冷却过程中每端的电荷是相反的。本杰明·威尔逊和约翰·坎顿发现，其他晶体具有和电石的电性相同的电性。

134

卡文迪许的静电测量

十八世纪下半叶在静电的精密测量方面作出了最初的重要的几步。在这个研究领域，我们遇到两个伟人：卡文迪许和库伦。

---

〔1〕 富兰克林供给哈佛大学以电仪器。在1753年的一封信中，他讲到了莱顿瓶的载荷量。在这个时期以前哈佛的电仪器必定是十分缺乏。在1750年约翰·温思罗普准备的关于天文学的、以及少数关于光学和电学的精彩讲演的手稿中，仅有一个关于电和磁的讲稿。特罗布里奇作了如下的一部分笔记：“如果把一根亚麻线拉开和拉住，并在它的一端接上一个受激的管子，那么在距离1200呎的另一端轻微的物体将被吸引。自从1743年以来这种电在世界上引起相当大的轰动，由此人们设想，自然界中的一些（至今还是）隐秘的现象具有本性，取决于……人们在如此带电时，他们的头和身体周围就出现了相当的亮光，象是画家笔下的圣人头部周围出现的光。”特罗布里奇还写道：“在哈佛大学，直到1820年以前，演示电和磁这个课题的全部仪器装置只有两个富兰克林电机、一个莱顿瓶式聚电器、以及用带电木髓球或类似的轻物体来演示电的排斥或吸引效应的小小的装置。”见 John Trowbridge, *What is Electricity?* 1897, p.26.

* Ceylon，锡兰，即现在的斯里兰卡——译者注。

卡文迪许[1](1731—1810)曾在剑桥的彼得豪斯学院(Peterhouse College)上过课，以后大部分时间住在伦敦。是什么影响促使他致力于实验科学，这件事是不可能弄清的，在他个人的历史上关于这个问题有一大片含糊不清之处。他在化学、热学、电学方面进行实验，但他对于发表他的实验结果以及得到发现的优先权方面很少关心。他过着奇特的隐居生活。俭朴的习惯使他把大量的收入积蓄了起来。“他在他的住所不接待陌生人，每天他用留在餐桌上的纸条来预定他的正餐，由于他的病态的害羞，他拒绝跟他的女佣人有任何交往。”[2]“在他的一生中他可能比有史以来任何一个活到八十岁的人更少讲话，除了拉特拉普(La Trappe)的修道士们以外。”[3]卡文迪许的一生都是在他的实验室和图书馆里度过的。[4]他的静电实验在1773年底以前就完成了，但仍然未发表。他只是发表了两篇电学论文，并且这两篇论文只包括了一些次要的材料。约在一个世纪以后，即在1879年，麦克斯韦出版了一本书，标题为《尊敬的亨利·卡文迪许的电学研究》，这本书是在1771和1781年之间写成的。麦克斯韦说：“这些论文证

135

〔1〕 *Dic.Nat.Biog.*

〔2〕 同上

〔3〕 Lord Brougham, *Lives of Philosophers*, London, 1855, p.106.

〔4〕 在一次午餐时，卡文迪许碰巧坐在赫谢尔旁边，赫谢尔当时正在建造图象的大小和准确性方面都是前所未有的望远镜，用这个望远镜可以看到没有“光芒”的星星。卡文迪许慢条斯理地对这个天文学家说：“赫谢尔博士，你确实看到星星是圆的吗？”“圆得就象一个钮扣。”赫谢尔博士大声说。这时谈话就中断了。直到正餐结束时，卡文迪许才重复了一句问话：“圆得象个钮扣?”博士兴致勃勃地回答道：“圆得象个钮扣。”以后再没有说什么话。引自“Herschel, Sir William” in *Dic. Nat.Biog.*

明卡文迪许几乎预料到电学上所有的伟大事实，这些伟大的事实后来通过库伦和法国哲学家们的著作而闻名于科学界。”卡文迪许研究了电容器的容量，并为他自己制造了一整套已知容量的电容器，他还以此测定了各种仪器样品的电容量。他发现，由49个莱顿瓶组成的电池含有 321,000“电吋”（约 1/2微法）的电容。他的“电吋”表示相同电容器的球体直径。我们现在的电容的静电测量与此不同，仅仅是以“厘米”和“半径”米代替“吋”和“直径”。卡文迪许预料到了法拉第关于不同物质的电容率的发现，并测量了几种物质的电容率。例如，他发现石蜡的电容率为1.81到2.47，而较晚时候的玻耳兹曼所测得的值为2.32，维尔内得到的是1.96，戈登得到的值为1.994。[1] 上述观念包含了电势的概念。卡文迪许在“电化度”的名词下引进了这个概念。他证明了静电荷处于导体表面，并证明电力跟距离的平方成反比，或者至少不会与这个比率相差1/50以上，在1781年他完成了相当于预测欧姆定律的探讨。[2]

遗憾的是，卡文迪许没有给他那时代的科学家们关于他的影响深远的研究结果的好处。值得注意的是，当卡文迪许创立许多新的概念和主要从事于电的计量时，他没有发明任何新的装置，库伦发明了扭转静电计；本涅特在1786年制成了金箔验电计，但卡文迪许没有设计类似的仪器，他所用的是木髓球静电计。

136

库伦对反平方定律的证明

库伦(1736—1806)出生在法国昂古莱姆(Angoulême)，在巴

〔1〕 Maxwell, *Elect. Researches of the Hon. H. Gavendish*, p.liii.

〔2〕 同上，p.lix.，§574,575,629,686．他没有象40多年后的欧姆那样仔细而又系统地研究出这个定律。

黎读过书，并在青年时代参了军。在西印度群岛服役几年后，他回到巴黎，当了工程师。同时他从事科学研究。当时考虑要在布列塔尼(Bretagne)挖掘通航运河的计划，库伦被海军部长派去考察河床。他的报告是不利于挖运河的。这样就触怒了一些有权势的人物，并藉口他没有国防部长的命令，他们把他拘留了。后来布列塔尼政府看出了自己的错误，并给库伦很大的报酬，但他仅仅接受了一只秒表，他在以后的实验中用过这个表。托马斯·扬说："据说他的道德品格就象他的数学研究一样端正。"[1]

库伦从事研究毛发和金属丝的扭转弹性。这导致他在1777年发明了扭转天平或"扭秤"。在这之前英国的米切尔曾提出一些类似的设计。[2]有一个世纪，这个扭秤被写进电学教科书中，虽然这个仪器现在已不在实验室中使用了。库伦以极大的机灵和精确性作了实验，并用它证明牛顿的反平方定律也在电的以及磁的吸引和排斥中适用。[3]他证明这种作用跟电量的乘积成正比；他也证明，电荷存在于导体的表面，并比较了导体不同部分的表面电荷。库伦是双流说的拥护者，并相信吸引和排斥是通过不要中介的媒质"超距作用"而发生的。在1785和1789之间发表的他的电学研究报告，为泊松后来建立他的电的数学理论提供了数据。[4]

137

动 物 电

从很早时候起人们就知道几种水生动物有引起电震的能力。

---

[1] *Misc.Works.* Vol.Ⅱ.,p.540.

[2] Heller, Vol.Ⅱ.p.499.

[3] 遵循反平方定律的磁作用是在这（约1760年）之前由哥丁根的托比阿斯·迈尔(Tobias Mayer)证明的。见 Albrecht, *Gesch.d'Elect.*.p.75.

[4] 库伦的七篇论文最初发表在 *Mémoirs de l'Académie royale des sciences*, 1785 和 1786。前四篇德译文载于 *Ostwald's Klassiker*, No.13.

在莱顿瓶的发明以后，人们就开始考虑到莱顿瓶的放电的生理效应和这些动物引起的电震之间的类似性。瓦尔斯在拉罗歇尔（La Rochelle）首次彻底地研究了这个问题，并证明鱼类传递的电震是带电性的。以一种导体将鱼背和鱼的下部相连接时，就发生放电。[1]

流电的发现

对动物电感兴趣的那些人中有波洛尼亚（Bologna）的医生和动物学教授**伽伐尼**（1737—1798）。一个偶然的事件导致他作出了关于流电或“伽伐尼电流”的伟大发现。据说他的妻子不健康，并且按吩咐要吃蛙腿。伽伐尼自己去宰青蛙。当他把青蛙剥了皮以后，他就把青蛙放在靠近起电机导体旁的桌子上，然后他离开了房间。他的妻子偶然拿起机器旁的外科用小刀，就在这时，刀尖碰上了蛙腿外露的小腿神经。电火花出现了，蛙腿激烈地痉挛。她将此事告诉了她的丈夫，而他重复了这个实验。这件事发生在1780年11月6日。伽伐尼自己的叙述是更为平淡的。[2]他的妻子在这个发现中没有起任何作用；只是一只青蛙被解剖了；一个助手首先注意到了痉挛。

138

伽伐尼开始对这个发现探讨原因。看来必需接触到神经才有电火花。当把蛙腿放在真空中时其效果相同。问题产生了，大气电和来自起电机的电同样有效吗？他用一个铁钩把青蛙腿悬吊在庭院的铁架上。蛙腿显示出运动的样子。当暴雨云经过时，蛙腿

---

〔1〕 他的论文发表在*Phil.Trans.*，在1773年和1774年，

〔2〕 见*Ostwald's Klassiker*，No.52，p.4．这个编号是伽伐尼论文“De viribus electricitatis in moto musculari Commentarius”（在*Comment.Acad.Scient.*Bonon.，1791上）的德译文的号码。

激烈颤动，不过在晴天有时也能看到它的颤动。起初他把痉挛归之于大气电的变化。后来他在室内把蛙腿放在金属板上并且用铁丝戳穿小腿神经直到和金属板接触，这样就成功地产生了同样的效应，在这以后他就放弃了把痉挛归之于大气电变化的现象。原因必定是在蛙腿、金属板或铁丝上。伽伐尼把蛙腿放在玻璃板上，并以弯曲的杆的两头同时接触蛙腿的神经和脚的肌肉两部分。若杆是玻璃的，则看不出什么效应；如果杆子是铜和铁或者铜和银作成的，就随之发生了长时间的颤动现象。一个铁杆单独引起的颤动，虽然不象两种金属组成的杆所产生的颤动那么持久和明显，但杆也能产生颤动，这一事实就使伽伐尼得出了杆仅仅是起一种导体的作用的结论。进一步的实验使他感到在神经中有电源。

伽伐尼的观察是惊人地新奇并使各地的科学人物都感到惊讶。他的同乡**伏打**(1745—1827)比他更深刻地探究了这个问题。伏打在他的出生的城市科莫(Como)的大学预科担任了五年的物理学讲座，在1779年以后，他在帕维亚(Pavia)大学担任了25年的物理学讲座。他曾经是电学方面的勤奋的实验家，并在1775年发明了起电盘。他发现了通过神经的放电能产生除颤动以外的其它效应。如果有一根弯杆是由两种金属组成的，其一端在上方与眼睛接触，而另一端放在他的嘴里，那么，当它们接触的瞬间就有光亮的感觉。舌头舐着的一个金币和一个银币，一旦用一根导线把它们连接起来时就产生了苦味。[1]这样一来，电不仅能够产生颤动，而且还影响视觉和味觉神经。伏打猜测，在所有这些实验中本质的东西是不同金属的接触。1794年以后他开始着手证明这个假说。伽伐尼确定电在蛙腿中的地位，并认为金属杆就象在莱顿瓶中一样仅仅起着放电器的作用。如果伽伐尼的这种观点是

139

〔1〕 德国的祖耳策尔先尝到这种苦味。见 Edm, Hoppe, *Gesch. d. Elect.*, Leipzig, 1884, p.128.

正确的，那么，一种金属也将象两种金属一样容易产生痉挛。如果一种金属的一根导线的两端是在不同温度下，那么蛙腿就发生剧烈的抽搐；在温度相等时，蛙腿的抽搐几乎完全消失。所以伏打断定，由一根单一金属的导线所产生的微弱效应是由于它的条件稍有不同。伏打宣称这种新的电，就象“动物电”一样，也可以称之为“金属电”。他的接触说的最强有力的证据是从他的容电式验电器得到的。这是和一个小电容相联结的一个金箔验电器。象由两种不同的金属组合而成的棒中那样，一个微弱的电源能给电容器大量的电而又不显著提高它的电势。但是，当除去电容器的上面一块金属板时，电势则升高，并且验电器的金箔分开了。这实验似乎证明电是产生于两种不同金属的接触处，其中一种金属成为带正电的，而另一种金属是带负电的。

英格兰的伏打电堆

1800年3月20日伏打写信给那时伦敦皇家学会会长约瑟夫·班克斯，在这封信中他描述了伏打电堆，他把它称为是有别于电鲔的“天然发电器”的一种“人造发电器”。[1] 两种不一样的金属板，比如说锌板和铜板接触放置。在接触点上盖一片被水或盐水弄湿的法兰绒或者吸墨纸。然后接上另一对锌和铜板，如此等等，每一对这样的板都被潮湿的导体隔开。由一打或更多的金属板偶组成的这种电堆，就多倍地增加了单个偶的作用。在同一封信里，伏打解释了“杯冕”（Couronne de tasses或者 Crown of cups）。它是由盛有盐水或稀酸的许多杯子组成的，把一些一半锌和一半铜的金属条浸入到杯子的液体里。锌端浸入到一个杯子里，铜端浸入到另一个杯子里。这就是第一个伏打电池。

伏打写了这封值得纪念的信以后六个星期，第一个电堆在英

〔1〕 *Phil.Trans.*,1800,p.405.

国被尼科尔孙和卡莱斯勒制成，并在5月2日人们观察到用它实现水的分解。这个实验是电化学的基础。在1800年7月《尼科尔孙的杂志》上描述了这个实验，并且是在伏打自己关于伏打电堆的说明在《哲学会报》上刊印之前。[1]伏打的研究立即就得到了好评。早在1791年他当选为伦敦皇家学会会员，在1801年拿破伦请他到巴黎在学会上表演他的电堆实验。法国授与他金质奖章。

伏打和伽伐尼的争论使电学家们分为两个敌对的派别。伽伐尼支持者中最杰出的是德国的洪堡；伏打的支持者中最杰出的是库伦和其他法国物理学家。接触说被用于解释伏打电池。这理论从那时起直到现在都是争论的主题。只是在最近几年中现代化学理论才最终解决了这个问题。 141

声　　学

索维尔(1653—1716)在声学方面做了重要的研究。他出生在拉弗莱什(La Flèche)。为寻找他的出路，他在17岁时就步行到巴黎。1686年，他成为皇家学院的数学教授。他口吃，并有一双很不利于学音乐的耳朵，以致他只能在乐师的帮助下比较音调。[2]然而他的声学论文却是很重要的，这些论文在1700—1703年间发表于《科学院纪要》中。他与诺布尔和皮戈特无关，独立地发现了弦线的泛音。他用纸游码来找出波节和波腹的位置。他观察了共振并正确地解释了拍。他调换了两个比率为24:25的风琴管，并观测了每秒4拍。他从这里断定，高音管每秒钟振动100次。

---

〔1〕 水的电解在较早时候曾被牛津的阿什博士、佛罗伦萨的法布防尼、美因茨的克雷弗所实现，但是尼科尔孙和卡莱斯勒最先系统地研究了这个现象，并证明了被电离出来的气体实际上是氢和氧。见 Hoppe, *Gesch. d. Elect.*, Leipzig, 1884, pp.132—139.

〔2〕 Rosenberger, *Geschichte der Physik*, Part, Ⅱ., p.269.

他以很大的精密度测定了振动比。[1]波洛尼亚的斯坦卡里用齿轮作了这种测量。[2]

汽笛的最早发展发生在英国。在1793和1801年间爱丁堡大学的物理学教授罗比孙继续了胡克的实验。使齿轮很快地相继打在小齿轮的齿上，以便在轮齿之间压出部分空气；或是穿过管中的空气交替地受运转着的活塞或阀门的启闭而通过管子。[3]

---

〔1〕 参阅马赫论索维尔，在 *Mittheil. d. deutsch. math; Ges. zu Prag*, 1892；摘要见Poske's *Zeitschr.*, Vol. VI., pp.39—41.

〔2〕 Ernst Robel, *Die Sirenen, Ein Beitrag zur Entwickelungs geschichte der Akustik*, Berlin, 1891, Theil I., p. 5.

〔3〕 同上，pp.7—10. 又参阅 Robison. "Temperament of the Scale of Music"，在 *Encyclopoedia Britannica* 第三版中；Thomas Young, *Lectures on Nat. Phil.*, London, 1807. Vol. I., p.378.

十 九 世 纪

142

在物理学的思辨方面，十九世纪推翻了前一百年的最重要的学说，并在十七世纪奠定的老基础上大大地作了更新。光的发射说让位给波动说；被称为"热质"的物质被搁在一边，并确立了热是由于分子的运动的事实。人们摒弃了由电的单流说或双流说的倡导者所假定存在的不可称量的物质，而倾向于下列观点，即用在某些情况下光以太中存在着脉动和胁变来解释电和磁的现象。能通过玻璃而不受阻力的磁流，现在只有历史学家对它感兴趣了。化学上的物质燃素也不再存在了。十八世纪的七种不可称量的物质没有一种继续存在，但是十七世纪的光以太却再次被承认，并在物理学思辨中被赋予头等重要的地位。此外，物理学的两大分支光学和电磁学实际上合成为一个分支。虽然观察到的现象很多倍地增加，但是人们把从前似乎是任意的和孤立的现象纳入逻辑一贯的和广泛的体系之中，使它们的解释简单化了。人们看出，在过去认为是完全无关的物理学各个广阔领域中存在着密切的关系，这一事实表明，物理学的发展是处在正确的方向。十八世纪还不知道的能的概念被引入了。辐射能已发展成为重要的课题。

在它的姐妹科学化学发展的刺激和帮助下，物理学在这一百年期间作出了不可思议的进展。在这个世纪初，化学家用他的天平建立了质量守恒定律。继之而来的是物理学家，他们大胆鲜明地提出了无所不包的能量守恒原理。十九世纪确实是以作为科学

143

上互相关联的时代为特征的。[1]

在以前的任何一个世纪都没有看到象这样庞大的科学工作者大军，也没有看到这样广泛的关于所有物理对象的实验知识的积累。理论和实验携手前进。蒸汽和电被用来为人类的需要和舒适服务。

欧洲的各个主要国家都对这种科学进展作出了贡献。在英国，当英国人改变了对牛顿的偏爱态度之后就出现了多产的新时期，并且人们发现了这条真理，任何人物不管多么伟大都不能在所有方面全不犯错误。在这个时期的较早的科学家中有赫谢尔，托马斯·杨，戴维爵士和布鲁斯特爵士。

由于宗教斗争而搞得贫困、荒芜和政治上纷乱的德国，在拿破仑战争以后开始复兴并在科学方面作了极大的努力。在这世纪早期，德国物理学家对待哲学家和数学家的态度是奇怪的。哲学家黑格尔和谢林的晦涩的和无法验证的论断是有害于科学的[2]。但是开始了一种反动。在柏林形成了一个科学家的经验学派，其中包括波根多夫，里斯，多弗，马格努斯。他们蔑视形而上学的 144 蒙昧主义。这个学派的领袖马格努斯为现代物理实验室的进展作

---

〔1〕 Paul R·Heyl, *The Fundamental Concepts of Physics in the Light of Modern Discovery*, Baltimore,1926,p.28.

〔2〕 赫尔姆霍茨在 *Wiedmann's Annalen*, Neue Folge, Vol.54. 1895.pp.2 et seq.赫尔姆霍茨在他的演讲《论自然科学和一般科学的关系》(On the relation of natural science to general science, 载于 *Popular Lectures*, transl.by E·Atkinson, London,1873,p.7)中说："黑格尔……开始非常激烈和尖刻地反对自然哲学家，特别反对作为物理学研究的第一个最伟大的代表人物牛顿爵士。哲学家们责怪科学人物眼界狭小；科学人物反责这些哲学家们狂妄。"又，参阅 Rudolph Virchow, "Transition from the Philosophic to the Scientific Age", *Smithsonian Report*, 1894,pp.681—695.

了大量的工作。

说来奇怪，马格努斯在数学方面没有做什么工作。这种对物理学研究中应用数学片面的和无根据的观念并没有传给他的伟大的学生克伦尼希、克劳修斯和赫尔姆霍茨。马格努斯的所有德国同时代人也没有避开数学物理学。这个分学科得到哥丁根的高斯和韦伯，柯尼斯堡（Konigsberg）的诺埃曼的培育。促进物理实验家和物理数学家联合行动的第一次运动在1844年于柏林的物理学会的组织中举行的，这产生于由马格努斯主持的物理学"讨论会"。[1]

十九世纪初在法国有一批非常卓越的科学人物，我们只要提一下拉格朗日、拉普拉斯、菲涅耳、阿拉哥、毕奥、卡诺和付里叶就行了。在这个世纪中叶以前，其他一些国家的科学成就无法和法国相匹敌。

在本世纪最后二十五年以前，美国所取得的成就比较少，而那时美国的少量成就也未能引起国外科学界的注意。

物 质 结 构

原 子 论

就在道尔顿的时代以后不久，人们普遍地把原子看成是不可穿透的刚性固体。任何一种化学元素的所有原子都被假定为具有相同的"重量"；任何两种不同元素的原子具有不同的"重量"。少数科学家把原子看成是其内各部分有相对运动的弹性体；其他的科学家拒绝这个假设，因为它太复杂并且不能适应对它的需要。但是，在两个非弹性原子碰撞时运动的能量将要损失，因此， 145

[1] G·Wiedemann in *Wiedemann's Annal*, Vol.39, 1890, "Vorwort"

原子的一个集合体的动能通过内部碰撞会逐渐减少——这种情况跟经验相矛盾。

克服非弹性原子假说的后果的一种模式、是如十八世纪博斯科维奇（1711—1787）曾经提出过的假设，即认为原子只是起超距作用的吸引力和排斥力的中心、并且实际上没有原子的碰撞。安培、科希和法拉第都把原子看成是没有广延的，或者把原子仅仅看作是力的中心。但是，原子没有广延却有质量并能被各种力所作用的这种假说，是十分难以理解和难以想象的。

分　子

克服非弹性原子的困难的另一种尝试是假定物质的最小微粒不是原子、而是一组原子，后来人们称这为分子。十八世纪时对“分子”一词的使用是含混不清的。道尔顿把一氧化氮的分子NO说成“原子”（atoms）。阿伏伽德罗（1776—1856）于1811年把“组合分子”（molecules intégrantes）（我们现在称为分子）和“基本分子”（molecules élémentaires）（我们现在称为原子）作了区别。勒尼奥[1]在1859年把分子和原子作为同义词来使用，并谈到“简单”分子和“复合”分子。李比希[2]采用了“简单原子”（einfache Atome）和“复合原子”（zusammengesetzte Atome）的术语，分别指我们所说的原子和分子。在李比希的《化学著作》的英译本（Letters on Chemistry）中，编辑布莱思用过“复合原子或分子”（Compound atoms

---

〔1〕 V.Regnault, *Cours élémentaire de chimie*, Paris, 1859, 5 Ed.,p.3.

〔2〕 Justus von Liebig, *Chemische Briefe*, 4 .Ed., 1859, p. 132, 224（I.Ed.,1844）.

or molecules）的说法。1868年，化学家罗斯科[1]作出定义："分子是组成化学物质的最小部分的原子群，无论简单或是复合，分子都能被游离或能单独存在……，一个水分子 H_2O 包含了二个氢原子。"麦克斯韦于1873年在英国协会上的演说中，是在"原子"的意义下使用"分子"这个词，正如化学家使用这个词一样[2]。作为一个物理学家，麦克斯韦把注意力放在物质的那些小小的部分上，这些部分的"任何再进一步的划分"都会使它们失去物质"具有的特性"。[3]后来他讲到，"每一个分子内部的运动都是由分子成份中的转动和振动"组成的；他注意到"分子"是由"原子"组成的[4]——事实上，他使用了现代的术语。

146

虽然原子被当作非弹性体，但分子的行为被假定为恰如弹性体一样。克劳修斯和麦克斯韦都采取了这种观点。开尔芬勋爵说[5]："现代物理学的能量守恒理论不允许我们假定终极分子为非弹性或非完全弹性。"彼此相撞的、好象完全弹性的小球一样的分子，在气体运动论中起着重要的作用，以后一系列物理学家很成功地发展了这理论：焦耳在1848年，克伦尼希在1856年[6]，克劳修斯在1857年[7]，麦克斯韦在1860年[8]，以及以后的玻耳兹

---

〔1〕 Henry E.Roscoe, *Lessons in Elementary Chemistry*, London, 1868, p.114.

〔2〕 F.Soddy, *The Interpretation of Radium*, 4.Ed., New York,1920,p.158.

〔8〕 C.Maxwell, *Theory of Heat*, 7.Ed.,1883, p.305,311,312 (I.Ed.,1871)

〔4〕 C.Maxwell, Art., "Atom", *Encyclop. Britannica*, 9th Ed,.

〔5〕 *Phil.Mag.*, 4.S., Vol.45.1873,p.329.

〔6〕 *Poggendorff's Annalen*, Vol.99,1856,p.315.

〔7〕 同上. Vol.100,1857,p.353.

〔8〕 *Phil.Mag.*, Vol.19,1860,p.22.

曼[1]等人。

涡旋原子

避开非弹性原子的困难的第三种方法是开尔芬勋爵的涡旋原子。[2]赫尔姆霍茨表明，在均匀的、不可压缩的和无摩擦的流体中能够存在涡旋管，管中的流体作持久的不变的转动，而且这样的一种管能形成一种闭合的稳定的环。开尔芬的假说是把这种环看作原子，他还发现，这样的涡旋环比任何一种较早的原子〔模型〕具有更多的理想原子的性质。除了只有涡旋环具有物质的特性以外，原始流体还具有惯性。麦克斯韦指出了把惯性解释为仅仅是一种物质运动方式的惯性，而不是物质本身的惯性的困难。

147

原子论的反对派

有才能的人在拒绝或接受一种假说时也容易滑到错误的方向上去，发生在十九世纪晚期对原子论的反对很好地证明了这一点。在十九世纪最后二十五年中，若干批评家对给予原子论和分子论的巨大声望感到遗憾。马赫（1838—1916）问道[3]，既然我们不能考证世界的各块砖石，为什么我们要把世界想象为一个镶嵌工艺品呢？的确，我们不能对实际上看见原子或检测单个原子的效应抱任何希望，因为威廉·汤姆孙爵士在1883年通过四方面的推理论证了原子是极端微小的，这些推理“分别根据光的波动

〔1〕 *Wiedemann's Annalen*, Vol.24, 1885, p.37.

〔2〕 W·Thomson, "Vortex Atoms", *Proceed. Royal Soc. of Edinburgh*, Feb., 1867; *Popular Lectures and Addresses*, Vol. I., 1889, pp.235—252.

〔3〕 见 *Kultur der Gegenwart, Physik*, Berlin, 1915, p.224.

说、接触电现象、毛细管的吸引作用和气体运动论，一致认为，普通物质的原子或分子的直径必定多少象是10^{-7}或从10^{-7}到10^{-8}厘米。”[1]反对原子论的首领是柏林的奥斯特瓦尔德。他把能量守恒原理作为偶象来崇拜、并把能量看作为终极的实在，他还尽力使科学摆脱“那种不能导致直接用实验证实结论的假说性观念。”他摒弃原子论和分子论，说“这些有害的假说”把“钩子和尖针加在原子之上”。[2]他强调直接研究经验事实和由事实得出的图表。在1897年，玻耳兹曼[3]在一篇论自然科学中原子论的必要性的文章中对这种态度提出了坚决的抗议。奇怪的是，对原子论的反对恰好出现在第一批坚决而又确实地证实原子论的有效实验事实被揭示的时候。

148

光　学

波　动　说

托马斯·杨（1773—1829）出生在英国索默塞特郡(Somersetshire）的米尔弗顿（Milverton），我们要感谢他，因为他复兴了被忽略了一个世纪之久的光的波动说。这位伟大的科学家有一个非凡的幼年时代。在他两岁时他就能很流畅地读书，当他四岁时，他已通读了两遍圣经；当他六岁时，他能整篇地背诵“哥德斯密思的《荒村》”(Goldsmith's Deserted Village)。他目过数行，贪婪地阅读各种书籍，无论是古典的、文学的或是

[1] W·Thomson, *Popular Lectures and Addresses*, Vol.1., London, 1889, p.148.

[2] 奥斯特瓦尔德在较晚的时候论述到这个问题，见他的Faraday Lecture, 在*Nature*, Vol.70, 1904, p.15; Ostwald's Ueber Katalyse, 2.Ed., Leipzig, 1911, pp.25, 26.

[3] *Wiedemann's Annalen*, Vol.60, 1897, p.311.

科学上的著作；说也奇怪，在他的发育成长中，他并没有减退体力和智力。在他约十六岁时，由于他反对贩卖奴隶，他戒用食糖。在他十九岁时，他开始先在伦敦、而后在爱丁堡、哥丁根、最后在剑桥学医。1800年他开始在伦敦行医。第二年他接受了皇家研究院自然哲学教授的职务，这个研究院是由伦福德伯爵在这之前一年建立的京城的科学院。他担任这个职务有两年之久。从1802 149 年的一月到五月，他做了一系列讲演。这些讲演和后来的一系列讲演以《关于自然哲学和机械工艺的讲演》(Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts)为题在1807年出版，这本论丛今天还值得一读。1802年他被委任为皇家研究院的外事秘书。他担任这个职务直到他生命的最后一刻为止。

杨的最早研究是关于眼睛的构造和光学特性。而后，1801—1804年是他光学发现的第一个时期。他的学说受到嘲笑，于是他着手其它的研究工作。连续有十二个年头，他花费在医疗职业和语言学的研究上，特别是辩读象形文字的著作。然而，当法国菲涅耳开始光学实验并且特别突出杨的理论时，杨才重新恢复他早期的研究，进入了他的光学研究的第二个时期。

1801年，杨在皇家学会宣读了关于薄片颜色的论文，他在这里表示他自己强烈地倾向光的波动说。**干涉原理**的引入是这篇文章跨出的重大一步。“两个在方向上或者是完全一致或者是很接近的不同光源的波动，它们的联合效应是每一种光的运动的合成”。[1]这个原理的不完全的暗示曾出现在胡克的《显微术》(Micrographia)中，但杨直到他独自取得新见解之后才知道这些暗示。杨第一次彻底地用干涉原理解释了声和光。他以这个原理解释了薄片的色彩和刻条纹的表面或“条纹面”的衍射颜

[1] *Miscellaneous Works of the Late Thomas Young*, edited by George Peacock, London, 1855, Vol. I., p.157. 也见p. 170.

色。[1]杨的观察是以极大的精密度做的，但是，他说明这些观测 150
事实的方式，正如他的大部分论文一样，是简洁而有点模糊不清的。他的包含有重要的干涉原理的论文成为自牛顿的时代以来发行的最重要的物理光学出版物。但它们并未在科学界留有印象。布鲁厄姆在《爱丁堡评论》(Edinburgh Review) 第Ⅱ期和第Ⅳ期上对这些论文发起了猛烈的攻击。杨的文章被宣称为"没有值得称之为是实验或是发现的东西"，"没有任何价值"。布鲁厄姆说："我们想对革新创造发表点意见，它们除了阻碍科学的进展以外不会有别的效果。"在指责干涉原理为"荒唐"和"不合逻辑"以后，这个评论者说："我们现在暂时不接受这个作者无能的学究气的作品，从中我们未能找到一些有关的学问、敏锐和独创的痕迹，本来我们为这些东西可以弥补他在顽强的思考力、冷静和耐性的研究、以及通过踏实和慎审地观察自然的运转而成功地发展自然规律方面的明显缺点。"[2] 杨发出了有力的回答，它是以一本小册子的形式发表的，但是并未使公众的舆论转向赞成他的学说；因为正如他自己所说的一样，"只卖了一册"。[3] 丁铎尔说[4]："通过那时掌握了舆论界的一个作者的激烈挖苦，这个有天才的人被压制了——被他的同胞的评头评足的才智埋没了——整整二十年，他事实上被当作梦呓者。……他首先要感谢著名的法国人菲涅耳和阿拉哥，感谢他们恢复了他的权利。"

菲涅耳（1788—1827）出生在诺曼底（Normandy）的布罗

---

〔1〕 波意耳第一次观察到光滑面上的条纹的颜色。后来，刻在玻璃上的线纹样本是由巴顿先生创制的，当把它转到钢上时——正如在以他的名字闻名的钮扣中的情形一样——就产生非常美丽的赋色效应。见 G·Peacock, *Life of Dr.Young*, 1855, p.149.

〔2〕 *Edinburgh Review*, No.Ⅸ., 6th ed., Vol.Ⅴ., p.103; *Young's Works*, Ⅰ., p.193.

〔3〕 同上，Ⅰ., P.215.

〔4〕 *Six Lectures on Light*, 2d.ed., New York, 1877, p.51.

意（Broglie）。在他的学生时代他的进步很慢，八岁时他才勉强能读书。[1]他的身体总是虚弱得很。他不象杨一样，没有希望151成为一个大学者。在他十三岁时他上了卡昂（Caen）的中心学校，在十六岁时他上了巴黎的综合技术学校。然后上桥梁和道路学校。以后他又当了约八年的政府工程师。他是一个很顽固的保王党员，并且加入了反对拿破仑从厄尔伯岛（Elba）回国的军队组织。结果是他丢掉了职位。在路易十八世复位时，菲涅耳得到了一个新的工程师职位。他在1815年开始他的实验研究。他在1814年12月的一封信中讲了如下的话："我不知道光的偏振意味着什么。"在一年的时间内，他就把他的一篇关于衍射的重要论文寄给了科学院（在1815年10月）。紧接着就很快完成了其它的一系列论文。[2]在由点光源发射出的光束中放上一根细线，精确地测定从这光束的轴到所产生的条纹的距离。正如杨在较早时候做过的一样，他注意到，当通过细线一边的光在它达到屏之前把它挡住时，影内的光带就消失了。菲涅耳不知道杨早在十三年以前就已经取得了这个成就，他正被引向发现干涉原理。许多物理学家不倾向于承认这个现象就是由于干涉。自从格里马耳迪时候起，人们就已经知道衍射条纹。并且已经根据发射说、用光的微粒和引起衍射的物体边缘之间进行吸引和排斥的臆想的定律来解释这种现象。为了消除这些反对意见，菲涅耳设计了一个值得纪念的实验，这个实验产生于二个与小孔或不透明障碍物边缘都无关的小光源。用两块彼此形成一个接近180°角的平面金属镜，他避开了衍射，而以反射光束产生了干涉现象。

阿拉哥和潘索受命报告菲涅耳的第一篇论文。阿拉哥热情152地研究了这个问题，并且成为法国第一个改信波动说的人。由于

---

〔1〕 F.Arago, *Biographies*, 2d Series, Boston, 1859, p.176.

〔2〕 参阅 *OEuvres complètes d'Augustin Fresnel*, Paris, 1866, 三卷本，由费尔德（1824—1866）作的导言。

菲涅耳的一些数学上的假设不够好，因此，属于严密的数学学派的拉普拉斯、泊松等人起初都不屑于去考虑他的理论。菲涅耳受他们的反对意见的刺激而作了更大的努力。杨没有以大量的数值计算证明他的解释。菲涅耳在大得多的程度上应用了数学分析，并且使许多人开始相信波动说。他对于反对波动说的老意见——即波动说不能解释影子的存在或者光的近似直线传播——作了全面的回答。光的干涉现象和声音的干涉现象不同是由于光的波长要短得多。

和杨不一样，菲涅耳广泛采用了惠更斯的子波原理，菲涅耳这样讲道："在任何一点的光波振动可以看作在同一时刻传播到那一点上的光的元振动的总和，这些元振动来自所考察的未受阻拦的波的所有部分在它以前位置的任何一点的各个作用。"[1]

正是阿拉哥第一个使菲涅耳注意到杨的研究，并且把这个法国学者的第一篇论文寄给了那位英国医生。令人高兴的是，他们之间不存在激烈的优先权之争。菲涅耳在1816年给杨的信中写道："如果有什么能够安慰我没有获得优先权的利益的话，那就是，对我来说，我遇到了以如此大量的重要发现丰富了物理学的学者，同时他大大地有助于加强我对于我所采用的理论的信心。"[2]杨在1819年10月16日给菲涅耳写道："先生，我为您赠送我令人敬羡的论文表示万分感谢，在对光学进展最有贡献的许多论文中，您的论文确实也是有很高的地位的。"[3]

让我们进一步讲光的双折射和偏振。巴托利努斯用冰晶石观察到双折射。牛顿和惠更斯都曾研究过偏振。惠更斯讲过单轴晶体的非常折射的真实定律。他们把"双面"或"偏振"的性质看

---

〔1〕 G.Peacock, *Life of Thomas Young*, London, 1855, p.167.

〔2〕 *Young's Works*, Vol.1.,p.378.

〔3〕 同上,Vol.1.,p.393.

作是仅仅与双折射有关的孤立的事件。过了一个世纪以后，马吕斯观察到偏振可以伴随着反射。这样，除了晶体的作用外，还可以用其它的方法使光发生偏振。

马吕斯（1775—1812）出生在巴黎。他受过作为军事工程师的教育，并在德国和埃及的法国军队中服过役。后来，在他指挥的在安特卫普（Antwerp）和施特拉斯堡（Strassburg）进行的工作期间，他找到了时间来从事研究法国学会提出的寻求双折射的数学理论的有奖赛题。他偶然地得到了有关上述问题的发现。他通过一片晶体看到从卢森堡宫的窗户反射到他所居住的在因弗尔街（Rue d'Enfer）的住宅的太阳的像，他很惊奇地发现，当晶体在某种位置时〔太阳的〕双像之一消失了。[1]他试图以光在大气中运行时发生某种变形来解释这个奇特的现象。但当晚上时，他发现烛光以36°角落在水面时会有类似的情况，事实上，烛光是偏振化了。此外，如果从方解石来的两束光同时以36°角落在水面，并且如果寻常光线部分地被反射，而非常光线全然不被反射，反之也一样。这样，在一个晚上，马吕斯创造了现代物理学的一个新分支。

154

这时候，波动说还没有对偏振现象作出解释，它处在被马吕斯发现的大量新事实推翻的危险之中。托马斯·杨在1811年写信给马吕斯（他是发射说的一个坚决的信徒）：“你的实验证明了我所采用的理论（即干涉现象）的不足，但是这些实验并没有证明它是错的。”[2]正如惠威尔说的一样，[3]毫无疑问，这是“波动说历史上最黑暗的时候。”杨没有隐匿困难；他也没有放弃调和这个表面上的矛盾的希望。经过了六年以后，曙光开始出现了。在1817年1月12日，杨给阿拉哥写信道：“根据这个〔波动〕

---

〔1〕 *Young's Works*. Vol.11., p.593.

〔2〕 Arago's *Biographies*, 2d Series, 1859, p.159.

〔3〕 *Inductive Sciences*, New York, 1858, Vol. II., p.100.

学说的原理，所有的波都象声波一样是通过均匀介质以同心球面单独传播，在径向方向上只有粒子的前进或后退运动，以及伴随着它们的凝聚和稀疏。虽然波动说可以解释横向振动也在径向方向并以相等速度传播，但粒子的运动是在相对于径向的某个恒定方向上；而这就是偏振。”[1]这是一个巧妙的提示，它使人们有可能理解光线如何能够显现出两面性。后来，人们选定了垂直于光线的特定方向来代替杨所说的“恒定方向”。菲涅耳独立地获得了这个解释的模式，但它的论文发表在杨之后。在领悟横向振动的说法时，从阿拉哥对惠威尔的叙述中产生了某种困难的观念：“当他（阿拉哥）和菲涅耳已经得到了他们共同关于相反的偏振光线的非干涉性的实验结果时，并且当菲涅耳指出，只有横向振动才可能把这个事实纳入波动论时，他自己表示，他没有胆量发表这样的一种观点；因此，《论文》的第二部分仅仅是以菲涅耳的名字发表的。”[2]菲涅耳推进了偏振光的整个课题。通过某种晶体的偏振光所产生的多种颜色是阿拉哥在1811年发现的。两个对立的光学学说的坚决拥护者促进了发现这种消偏振现象的解释。杨根据波动说第一个作出了解释，而后阿拉哥和菲涅耳更充分地解释了它。毕奥根据微粒说在复杂的非常优美的数学研究中对这些事实作了解释。这受到拉普拉斯和其他数学家的赞赏，他们发现毕奥的思辨比菲涅耳的那些解释更符合他们的思考习惯。阿拉哥参加了反对毕奥的行列，这两个物理学家进行了如此激烈的争论，以致一度曾经亲密合作的两个人完全变得疏远了。[3]约1816年毕奥发现了显示双折射的电石片，但它吸收寻常光线。

155

[1] *Young's Works*, Vol. 1., p.333.

[2] *Inductive Sciences*, Vol. Ⅱ., p.101.

[3] *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, Vol. Ⅵ., 1862—1865, P.16 et seq., “Jean Baptiste Biot”。

这就导致他制造闻名的电气石钳以便研究偏振现象。他还提出了重要的旋光偏振定律并把它应用于各种物质的分析。

布鲁斯特（1781—1868）很成功地对晶体的偏振光现象进行了考察。虽然他受过牧师训练，但他从未束缚在他充当的职业上。在1799年他受到他的同学布鲁厄姆的鼓动，重复并研究了牛顿的衍射实验。从那时起布鲁斯特几乎是连续地从事创造性研究。他成为圣·安德鲁斯的物理学教授，后来又当上了爱丁堡大学校长。在1819年他跟詹姆森合作创办了《爱丁堡哲学期刊》（Edinburgh Philosophical Journal）。他是英国科学发展 156 协会的主要组织者，这个协会在1831年于约克（York）举行了第一次会议。他由于发明万花筒而变得很出名。在英国和美国这两个地方万花筒的销售量非常之大，以致有一个时候供不应求。象毕奥一样，布鲁斯特从没有对波动论好感过。“这位光学矿物学的、二轴晶体的偏振定律的和被压缩的双折射定律的发现者”是在一种精神框架中作断言，甚至于在杨、菲涅耳和阿拉哥已经给世界作出了成熟的研究以后还断言，“他对于光的波动说的主要异议是，他不能设想造物主竟有如此笨拙安排的错误，为了产生光竟将以太充满空间。”〔1〕

光　　速

1825年以后，虽然仍有几个著名的科学家支持发射说，但它被大多数物理学家特别是年轻人抛弃了。人们以为，彻底摧毁发射说的全部有效的决定性检验是到十九世纪中叶才完成的。按照牛顿的发射说，光速在光学上较密的媒质中较大，而根据波动说光速在其中是较小。早在1834年就用旋转镜测定电火花持续时间

〔1〕 J.Tyndall, *Six Lectures on Light*, 2d ed.,New York, 1877,p.49.

的惠斯通提出，同样的方法可以用于确定光速，并且确定在折射率更大的介质中光速是否更大。这思想被阿拉哥所采纳，但是由于他的视力不佳，这个研究课题就留给了更年轻的人。〔但是，这种测定光速的方法〕在机械上的困难是很大的；一面镜子必须具有每秒转动一千多次的速率。阿拉哥的计划被一些人认为是幻想。因为他们认为人眼要从具有如此巨大的速率转动的镜子中捕捉被反射的闪光的瞬时映像是不可能的。贝特朗说："按照巴俾涅的计算，一个认真刻苦的观察者可以在三年内有希望看到一次这种 157 光影。"[1] 佛科做了这个实验。他采用在现在几乎在每一本普通物理学教科书中都描述了的联合装置，用这个装置排除了上述的困难。[2] 在1850年5月6日他向科学院报告了他的实验的成功。他发现光速在水中比在空气中小，从这时起牛顿的发射说就被抛弃了。

佛科（1819—1868）出生在巴黎。他研究过医学，但在1845—1849年之间从事过物理学研究。此时他跟菲索共同工作。在他们分开以后，各自都做了光速的测定。上面讲到的佛科关于光在空气中和在水中的速度的关系的研究，是在阿萨斯街（Rue d'Assas）他的楼阁里进行的，并且他把它作为科学博士级的论文在1853年提出的。[3]在1851年佛科提出了一篇论文，论述了他用摆

〔1〕 Ph.Gilbert, *Léon Foucault, sa vie et son oeuvre scientifique*. Bruxelles, 1879, p.32.

〔2〕 详见 Delaunay, "Essay on the Velocity of Light", *Smithsonian Report*, 1864, pp.135—165.

〔3〕 Ph.Gilbert, 同上〔1〕, p.32.

对地球的转动作出的著名的证明。[1]第二年他发明了一种奇妙的

158 机械，叫回转仪。1854年拿破仑三世在巴黎天文台为他找到一个物理学家的职位。佛科对于使天文学仪器更加完善作出了许多贡献。[2]

佛科的初期合作者菲索（1819—1896）[3]出生在巴黎。他所占有的财产可以使他自由地从事自己的爱好，他献身于物理学研究。他把自己的私人财产的大部分用作他的研究手段。在1849年

---

〔1〕 这实验是在四个地方做的。第一个地方是在他的阿萨斯街的楼阁底下两米深的地下室。一个重量为5千克的黄铜球被一根钢丝吊起。这个球被拉到一边，并用一根线把它固定在那个位置上，直到它完全静止下来，然后用火柴烧断这根线使球自由活动。摆就开始在固定的垂直平面上振动，因而使地球转动的事实在实验上明显地表现出来。在人眼看来，振动面似乎是转动的而地球是静止的。理论指出，在给定的时间内这个可见的转动角度是等于在同样的时间内地球转过的整个角度乘以实验所在地的纬度角的正弦。这个定律的精确验证需要更为适当的条件。阿拉哥把天文台大楼提供给佛科使用，这座大楼能挂起十一米长的摆，这就使佛科能准确地证明其定律。由于拿破仑三世的赞助，第三次实验选择在伟人祠（the Pantheon）。一个28千克重的球被一根67米长1.4毫米粗的铁丝挂在那里。伟人祠挤满了观众。第四次表演是在1855年的世界博览会上进行的。这些摆的实验变得很闻名了。以前类似观测的唯一记载是在“西门图科学院”（Accademia del Cimento）的时期。以下的话被人们认为是维维安尼讲的：“我们观察了所有被单根线吊起的摆，这些摆都偏离了它们初始的垂直面，并且总是向一个方向偏离。”见 Ph.Gilbert, *Léon Foucault, sa vie et son oeuvre scientifique*, Bruxelles, 1879, p.55. 但是，没有材料可以证明这个意大利人推测了它的起因。

〔2〕 佛科的身体很瘦弱。里萨儒说：“似乎大自然要在佛科的体力和他的智力之间形成鲜明的对比。谁能预料到天才人物会有这样虚弱的外表？”见 Ph.Gilbert, 同上, p.13.

〔3〕 *Nature*, Vol.54, 1896, p.523; P.Larousse, *Grand Dictionnaire Universel*.

他做了最早的关于绝对光速的实验测定。勒麦和布喇德雷的测定是以天文观察为根据的。菲索转动一个以规则的间隔遮挡光的齿轮。间断性的闪光是来自安装在一定距离的镜面的反射。这个研究是在巴黎市郊相距为 8633 米的絮伦（Suresnes）和蒙马特里（Montmartre）之间进行的。[1]他的论文发表于1849年的《报告》（Comptes Rendus）（第29卷第90页），是在佛科关于光在空中和在水中的相对速度的论文（第30卷第 551 页）之前一年发表的。1862年，佛科应用他的方法测定光的绝对速度，并且得到了超过以前所有测量的精确度的值。[2]

菲索做了关于以太和物质的相对运动的实验，他把这些实验解释为证明透明介质内的以太是被运动着的介质往前拖曳，但其速度比介质的速度小。这些实验被迈克耳逊和莫雷证实，[3] 并由爱因斯坦重新对它作了解释。

159

菲索测定光速的方法被巴黎的科尔尼（1841—1902）和英国的詹姆斯·杨、以及乔治·福布斯作了一些改进后加以应用。在1874年科尔尼的实验中把反射镜安装在23千米远的地方。[4] 于1882年发表的杨和福布斯的测量，[5]似乎证明蓝光的速度比红光的快1.8%。这个结论的正确性是受到怀疑的。如果真是这样，那么，星体在食的前后将要现出颜色；此外，迈克耳逊用佛科方法看见了狭缝像的光谱图，这狭缝产生了十毫米宽的彩色图像。[6]

光速的最好的测定是在美国作的。1867年，那时海军天文台

---

〔1〕 Ph.Gilbert，同153页注〔1〕，p.36.

〔2〕 *Comptes Rendus*, Vol.55, 1862, pp.501, 792.

〔3〕 *Am.Jour.of Sci.*(3), Vol.31, p.377, 1886.

〔4〕 *Annales de l'Observatoire de Paris* (*Mémoires*, Vol.13, 1876).

〔5〕 *Philos.Trans.*, Part Ⅰ., 1882.

〔6〕 A.A.Michelson, ***Astr.*** *Papers for the Am. Ephem. and Naut.Almanac*, Vol.Ⅱ., Part Ⅳ., p.237, 1885.

的纽科姆（1835—1909）建议重做佛科的实验，它可能得到了太阳视差的更为接近的值。迈克耳逊（生于1852年）于1878年在安纳波利斯（Annapolis）海军学院的实验室做了初步的实验。[1] 2000美元的捐款使他能够继续实验。测量是在1879年做的。在纽科姆的请求之下，迈克耳逊于1882年在俄亥俄州克利夫兰的凯斯学院做了测定。佛科实验的主要困难是偏转太小了，以致不能准确测量下来。他所用的固定镜和转动镜之间的距离只有4米（可是，用5个固定的镜子使实验的距离实际上增加到20米），并且 160 送回来的像的位移只有0.7毫米。在迈克耳逊改进了的装置中送回来的像移过了133毫米，或者接近于佛科得到的结果的200倍。

在1879年3月，美国国会决定拨款5,000美元作为在纽科姆指导下的实验费用。可动镜安装在迈耶堡（Fort Meyer）。固定镜一度放在海军天文台（距离为2550.95米），又一度安装在华盛顿纪念碑（距离为3721.21米）。迈克耳逊参加了这个工作，直到他在1880年秋天迁到克利夫兰为止。在1880年夏天开始观察，并一直继续到1882年秋天，选择在春、夏、秋季最好的时候。只有在日出后一小时或日落前一小时的时候，大气条件才能使我们得到狭缝的稳定的像。一共做了504组测量，其中纽科姆测量了276组，迈克耳逊测量了140组，霍耳康姆测量了88组。[2]

以每秒千米为单位的真空中光速测量结果是：1849年菲索得到的是315,000；1862年佛科得到的是298,000；1874年科尔尼得到的是298,500；1878年科尔尼得到的是300,400；在1880—1881年杨和福布斯得到的是301,382；在1879年迈克耳逊得到的是

---

〔1〕 Joseph Lovering, "Address on Presentation of Rumford Medal to Prof. A. A. Michelson," in *Am. Acad. of Arts and Science*, New Series, Vol. 16, 1888—89, p. 384. 我们从这史料中取了几个材料。

〔2〕 参阅 S. Newcomb, *Astr. Papers for the Am. Ephem. and Naut. Alm.*, Vol. Ⅲ., Part. Ⅲ., 1885.

299,910；在1882年迈克耳逊得到的是299,853；1882年纽科姆得到的是299,860（只使用认为是排除了常有误差的一些结果）和299,810（包括了所有的观测结果）。[1]科尔尼、纽科姆和迈克耳逊在后来的估计中多少修改了他们的数据。年轻的迈克耳逊对光速特别感兴趣，在他的后半生中，他继续做光速实验。1926年，他测得的光速是每秒299,796千米。这个数据比他自已在1924年的较早的最好测定少24千米，比纽科姆在1885年的测定少64千米，比佩罗廷（1845—1904）在1900年的测定少104千米，并比科尔尼的最好的结果少154千米。[2]迈克耳逊的数据是在威尔逊山得到的，它跟作为远距测量站的圣安东尼奥山相隔22哩。一个新的特点是应用了八角形的转动镜，这提供了接受相继反射面的反射光的可能性，这样就免除了反射光线的角度偏差的测量。光速总被认为是自然界中最重要的常数之一，而且它被相对论放在更加基本的地位上，相对论把真空中的光速看作自然界中可能有的最高速度。

161

光谱线的最初观察

发光气体的光谱线的第一个观察是苏格兰人梅耳维尔在1752

---

〔1〕 这些数据和别的资料取自Preston, *Theory of Light*, Ch.XIX. 更详尽的关于光的研究的说明，参阅R.T.Glazebrook, "Report on Optical Theories," in *Report of British Association* 1885，摘要见Nature, Vol.48, pp.473—477; Humphrey Lloyd, Report on the Progress and Present State of Physical Optics in *Report of British Association*, 1834.

〔2〕 A.A.Michelson, *Science*, Vol.60, 1924, p.392; *Astrophysical Journal*, Vol.65, 1927, p.1.

年做的，[1]他死于1753年，年仅27岁。在1748—49年期间，他是格拉斯哥神学院的学生。自从牛顿对光谱的研究以来，他的研究标志着向前迈进了第一步。梅耳维尔观察了硇砂、钾碱、明矾、硝石和食盐被连续地放进酒精灯时所产生的光谱。“为了减少和限制我研究的对象，在我的眼睛和酒精火焰之间放上一块带有小孔的纸板，我用一块棱镜考察了这些不同光的组成——并且发现——当硇砂、明矾或钾碱放进酒精火焰中时，发射出了各种光线，但不是相同的数量；黄光比同时产生的其它一切光要明亮得多，红光比绿光和蓝光更弱……，大大地超过其它颜色的明亮的黄光必定是一种具有确定的可折射度的光，并且从它到邻近的较弱的颜色的光的过渡不是逐渐的而是直接的。”这“明亮的黄光”当然是“钠线”。直到最近之前，梅耳维尔的论文一直被忽视了，除了在1785年做火焰实验的摩根先生的一篇评论[2]以外，但摩根先生没有作出突出的贡献。后来伦敦的医生沃拉斯顿（1766—1828）在烛光火焰底部观察到蓝光的明亮光谱带[3]，现在称之为“斯旺光谱”（Swan spectrum）——圣安德鲁斯的威廉·斯旺在1856年又一次观察到它并作了描述。明亮光谱线的下一个观察者是夫琅和费。

162

我们先谈谈太阳光谱黑线的首次观察。沃拉斯顿看到了太阳黑线，他本来得到了开创重要的谱线研究的机会，但是，他恰好又没有跨出显著的一步而无所成就了。1802年他看到了七条谱线，其中最重要的五条光谱线被他认为是光谱的纯粹单色的自然

〔1〕 梅耳维尔在爱丁堡医学协会上宣读了两篇论文，它们于1766年发表在*Physical anel Literary Essays*，并再版于*Journal of the R. Astr. Soc. of Canada*, Vol.8, 1914. pp. 231—272.

〔2〕 *Philosophical Transactions*, London, Vol.75, 1785, p.190.

〔3〕 他的提取可锻性铂金的方法的发明，使他得到了大量的年度特许权使用费。他发明了明箱（Camera lucida）和凝冰器（Cryophorus）；他发现了钯和铑。

界标或分界线。[1]他的解释是有趣的，因为它表明，表面上似乎是一种最有理的学说倒可能是全无一点真理。沃拉斯顿说："……一束白光被折射而分成的颜色，就我看来，既不是在霓虹中常见的七种，也不能以（我所能找到的）任何方法缩减为如一些人所设想的三种。但是，……棱镜光谱的四种原始分法是可以以一定的清晰度看见的，我相信这种清晰度在这之前既未描述过也未观察过。"[2]

163

关于太阳黑线的第一个重要的研究是由夫琅和费做的，他不知道沃拉斯顿的发现。**夫琅和费**（1787—1826）出生在巴伐利亚的施特劳宾（Straubing）。他是一个穷苦的装玻璃工的儿子，幼年时就开始当他父亲的职业助手。由于他磨制玻璃的熟练技巧，他在贝内迪克特博厄（Benediktbeuern）村的乌茨希奈德(Utzschneider)光学研究所得到了一个职位。在1818年，他负责这个研究所，此后不久，这个研究所就搬迁到慕尼黑。夫琅和费

---

〔1〕 数学家和物理学家玛丽·索默维尔夫人作了如下的追忆："在一个晴朗的早晨，沃拉斯顿博士到汉诺威广场对我们进行一次访问。他说：'我发现了太阳光谱中的七条黑线，我想给你们表演看看'。于是，他关上窗户的百叶以便只留下狭小的光线，他把一个小小的玻璃棱镜放在我的手中，告诉我怎样使用它。因此我清楚地看到了它们。我如果不是最早的一个、也是第一批当中的一个看到他所表演的这些光谱线，它们是一系列最惊人的宇宙发现的起始，并且证明，我们地球上的许多物质也是太阳，恒星、甚至是星云的组成成分。沃拉斯顿博士给了我一个具有双倍价值的小棱镜，这是夫琅和费在慕尼黑制造的玻璃棱镜，夫琅和费黑线表如今已成为那门奇妙科学中的比较标准，这门科学是许多杰出人士的作品，本生和基尔霍夫使之臻于完善。"索默维尔的女儿 Martha Som.,*Personal Recollections of Mary Somerville*, Boston, 1874, p.133.

〔2〕 *Philos.Trans.*, 1802. p.378.

当上了慕尼黑科学院的成员和它的物理陈列馆的保管人。[1]

在他的光学著作中，夫琅和费把理论见识和实际技巧结合得非常好。“由于他新发明的和改进了的方法、装置以及磨制透镜的测量仪器，在1811年以后，还由于他的熔化玻璃工作的管理权，使他能生产没有脉纹的火石玻璃和大块的冕牌玻璃，特别是由于他的准确计算各种透镜的方法的发明，从而他把实用光学引向了一条全新的道路，并且他把消色差望远镜提到了当时意想不到的完善程度。”[2]

在努力于测定玻璃对特殊颜色的折射率以便设计更为精密的消色差透镜时，夫琅和费偶然地发现了一种灯光光谱的橙黄色的双线，现在称之为钠线。在油灯和牛脂灯光中，事实上，在所有的火光中，他都看到这条精细的、明亮的双线“精确地在同一地方出现，因此对于‘测定折射率’十分有用”。他把一束来自狭缝的光线照射在有相当距离的放在经纬望远镜前面的最小偏差位置上的火石玻璃棱镜上。夫琅和费进一步利用太阳光。他说：“我希望在太阳光谱中找出是否有象油灯光谱中的类似明线，并且，我用望远镜没有发现这条明线，却发现了大量的强的和微弱的竖直的线，然而，它们比起这光谱中其它部分更暗，有一些几乎是全黑。”[3]在检验其它物质如氢、酒精、硫磺时，他又一次地发现了这条明线。自然，这肯定是由于钠作为一种杂质而存在其中，最微量的钠也会显出它的谱线。夫琅和费还考察了星光的

164

---

〔1〕 Rosenberger，同19页注〔2〕．Ⅲ．，p．189．

〔2〕 E．Lommel，为夫琅和费的以下一书作的“序”：*Gesammelte Schriften*，p．VII，München，1888．

〔3〕 *Gesammelte Schriften*，同上，p．10．引自回忆录，“Bestimmung des Brechungs—und des Farbenzerstreuungs—Vermögens verschiedener Glasarten，in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernrohre”，初版于*Denkschriften der Munchener Akad*．，Band V．，1814—1815．

谱线，并且认出了金星中的某些太阳谱线。[1]

他是第一个观察光栅光谱的人，并最先用光栅测定了波长。他的光栅线是0.04到0.6毫米粗。光栅线间隔从0.0528到0.6866毫米。他做了十个光栅并用每个光栅找出D线的波长。结果是从0.0005882到0.0005897毫米的一排数值，其平均值为0.0005888毫米。如果我们注意到他的光栅是粗糙的，那么这个结果是相当精确了。[2]1823年的一篇论文包含有间隔各自为0.0033和0.0160毫米的二个玻璃光栅的实验。

夫琅和费1814年的论文没有立即得到承认，他的1821和1823年的论文也没有得到认可。物理学家们正在争论光的发射说和波动说。化学家们的注意力正集中在道尔顿的原子论和贝托莱-普劳斯特（Berthollet-Proust）关于定比定律的争论上。夫琅和费发表的新事实在近40年中未曾得到完满的解释。他自己又缺少打开太阳光谱"夫琅和费"线的神秘图谱的钥匙，他自己也不能明确肯定光谱线在化学分析中注定要起的那种作用。 165

在夫琅和费以后，英国首先做了研究。J·F·W·赫谢尔考察了几种物质的明线光谱，他讲到，明线的颜色可用以检测微量物质，并在1827年在他的《论光》著作中接触到了这个问题。惠斯通在1835年发表了一篇论通过金属的电弧光谱的论文。一个富裕的市民塔耳波特（1800—1877）表示相信，每一种物质的光线，无论它的颜色如何，总是表明存在着一定的化学化合物。但是，在这些研究者中尚未有人得到这个问题的清晰的见解。例如，塔耳波特犯了在我们的实验中没有经验的学生们经常犯的错误：他

〔1〕 G.W.A.Kahlbaum, *Aus der Vorgeschichte der Spectralanalyse*, Basel, 1888, p.12.

〔2〕 见 Fraunhofer, *Newe Modification des Lichtes*, 1821；也见 Louis Bell, "The Absolute Wave-Length of Light" in *Philos.Magazine*(5), Vol.25, 1888, p.245.

把某些明线光谱线视作为真正的黑线光谱。“铜盐的光谱带有暗线，类似于太阳光谱。”[1] 基尔霍夫指出，英国的研究者没有形成谱线严格地取决于火焰的特殊元素的概念；[2] 这样，塔耳波特把D线归之于硫磺和钠盐二者。布鲁斯特爵士在1832年描述了通过有色玻璃和某些气体的光线被吸收时所形成的黑线光谱。这些谱线象是太阳光谱。事实上，挥发的硝酸吸收了谱线，而液体是不吸收的，布鲁斯特以此提出反对光的波动说的论点；因为气体跟较密的液体比较起来应当显示出对以太运动的较小的阻抗。钠的明线和太阳的D黑线的严格相符是由国王学院的W·A·密勒和巴黎的佛科所确证的。佛科把显出钠线的太阳光和电光同时引进了分光镜中。当时考虑到的是，夫琅和费线的产生可能是由于某种光线被太阳的大气所吸收，但是，对这个解释的正确性并没有得到明确的结论。

166

光谱照相术

涅普斯（1765—1833）发现的照相术对光谱的研究是一个很大的帮助，他在1827年在金属上产生了照相图象。**达盖尔**（1789—1851）当了几年涅普斯的助手，继而改进了涅普斯的方法，在1839年发表了新的闻名的“达盖尔照相法”。纽约的德雷珀立即使用了这个有名的方法，他是第一个应用它来给人照相的人。在第一次实验时，“坐着照相的人的脸上……涂上白粉”，在白天照相要五分钟或七分钟。1840年，德雷珀对月球照相；1842年，他照了夫琅和费线，仅仅几个月以后，法国的**埃德蒙·贝克勒尔**

〔1〕 G.W.A.Kahlbaum，同上页注〔1〕，p.18.

〔2〕 G.Kirchhoff, “Zur Geschichte der Spectralanalyse,” *Gesammelte Abhandlungen*, Leipzig, 1882, pp.625—641 Rosenberger，同19页注〔2〕，Ⅲ., p.313.

(1820—1891)取得了类似的成就。在1843年费城的美国造币厂的机械师萨克斯顿为德雷珀刻画了玻璃制的衍射光栅，后者照了衍射光谱。我们现在要简略地叙述一下这个刻苦的研究者的一生。

德雷珀（1811—1882）出生于靠近利物浦的圣海林（St. Helen），并在伦敦大学念过书。他在1833年到美国。他在宾夕法尼亚大学研究医学以后，被选任弗吉尼亚州的汉普登-西德尼学院（Hampden-Sidney College）的化学和生理学讲座，在后来又担任了纽约大学同样的讲座，他在这里生活到他漫长生命的终了。多年来他住在靠近纽约的赫德森河畔的黑斯廷斯（Hastings-on-the—Hudson）的平静的休养所里，被那些能引起有经验的科学战士的兴趣的种种东西所包围。[1]

1847年，德雷珀发表了一篇重要的论文，[2]在这篇论文里，他从实验得出结论：当温度升高到525 ℃时，所有的固体物质和可能的液体都变成为白炽的、即红热状态；在525 ℃以下发射出不可见光，当温度升高到525 ℃以上时，连续不断地增加了更大的可折射性光；所有白炽固体的光谱都是连续的，气体也产生连续光谱，但是可能有一些明线叠加在上面。这后一点是不正确的。这个错误起源于他使用了发出固体碳的连续光谱的灿烂火焰，其中增加了放在火焰中的盐的线光谱；发光气体平常只产生明线。

十三年以后，基尔霍夫从理论考察中独立地推导出德雷珀的正确结论，他是从不同物体的辐射能的发射率和吸收率之间的关

---

〔1〕 *Am. Jour. of Science*(3), Vol. 23, 1882, p. 163; 也见*Nat. Acad. of Sciences, Biographical Memoirs*, Vol. Ⅱ., 1886, p. 351.

〔2〕 *Philos. Magazine*, May, 1847; J. W. Draper's *Scientific Memoris*, New York, 1878, "Memoir Ⅰ." 也见 J. W. Draper, "Early Contributions to Spectrum Photography and Photo—Chemistry", *Nature*. Vol. X., 1874.

系出发的。这个关系式在1854年被埃施特勒姆（后来又被斯图尔特）建立。

对太阳光谱中神秘图谱的解释

在基尔霍夫和本生之前对光谱分析的详尽说明可以进一步参考由埃施特勒姆、斯图尔特、布鲁斯特爵士、格拉德斯通、普吕克尔（即“普吕克尔管”的发明者）、范·德·维利根、埃德蒙·贝克勒尔和其他许多人作出的研究。[1]

基尔霍夫（1824—1887）出生在肯尼希斯堡(Königsberg)，他成为柏林的临时讲师，以后又是布雷斯劳（Breslau）的非常任教授，1854年当了海德尔堡(Heidelberg)的常任教授，1875年以后当了柏林的教授。他一生中丰富多采的时期是他在海德尔堡当教授的二十年，在那里他跟伟大的化学家本生（1811—1899）[2]共同工作。在1859—1862年期间，这两个伟大的研究者一起作出了光谱分析的伟大发现。那时海德尔堡的物理实验室非常简朴，它被设在150年前的称为“大厦”的房子里。这项值得纪念的研究是在一间小房里进行的。在1855年，他们把发光气体带进了大楼。[3] 1857年，本生和罗斯科第一次描述了“本生灯”[4]。这个新灯为本生和基尔霍夫提供了一种具有相当高温的不发光的气体火焰，在这火焰里化学物质能被蒸发，从而能得到单纯来自发光蒸汽的光谱。用这种方法就避免了以前的实验者的一些错误。

---

〔1〕 参阅 Kahlbaum，同161页注〔1〕；Kirchhoff，“Zur Geschichte der Spectralanalyse”.

〔2〕 关于他对化学的贡献，见 *Nature*, Vol.23, 1881, p.597.

〔3〕 Georg Quincke, *Gesch. d. Physik. Instituts. d. Univ. Heidelberg*, Heidelberg, 1885, p.16.

〔4〕 *Poggendorff's Annalen*, C, pp.84—86; Rosenberger，同19页注〔2〕. Ⅲ., p.484.

1859年10月，基尔霍夫和本生发表了他们的第一篇论文，[1]在这篇论文中包括了他们后来研究的核心。基尔霍夫从一些实验作出结论："一种带色的火焰光谱包含了明亮的锐线，当这些谱线的色光通过火焰时，这些带颜色的光线被减弱到如此程度，以致只要在火焰后面放上足够强的灯光时，暗线代替明线而出现，要不然就是在这灯光中不存在这些谱线"；"太阳光谱的黑线不是由地球的大气形成的，而是起因于在火焰中于相同地方产生明线的那些物质在灼热的太阳大气中的存在。"基尔霍夫断定，在太阳大气中存在有钠、镁、铜、锌、钡、镍。

169

这两位研究者提出了在科学上确立的关于光谱中的明线可以作为有关金属存在的确实标记的定律。用光谱发现了迪尔克海姆（Dürkheim）的矿泉水中的两种新金属使这个结论加倍可信。从它们被认知的蓝线和红线，这两种新金属被命名为"铯"和"铷"。作为地球上的科学的光谱分析是属于基尔霍夫和本生二人的功劳，而它在天体上的应用则属于基尔霍夫一个人。基尔霍夫对夫琅和费线的解释是划时代的。赫尔姆霍茨说[2]："事实上它有一些最突出的最非凡的影响，它对自然科学的各个分支都有最高的重要性。几乎没有其它的发现象它那样，唤起了人们的赞美和激励了人们的想象力，因为它能洞察那个对我们来说似乎永远是罩上了面纱的世界。"关于这一点，基尔霍夫经常讲到如下的故事[3]："夫琅和费线是否揭示了太阳中存在着金子这个问题曾被进行研究。基尔霍夫的财东对这个机会作了评论：'如果我不能把太阳上的金子拿下来，我为什么要关心太阳上的金子呢？'

〔1〕"Ueber die Fraunhoferschen Linien", in *Monatsberichte d. Akad. d. Wissensch. zu Berlin*, October, 1859, p. 662.

〔2〕"A Memoir of Gustav Robert Kirchhoff," *Deutsche Rundschau*, February 1888, Vol. 14, pp. 232—245；译文载于 *Smithsonian Report*, 1889, pp. 527—540.

〔3〕*Smithsonian Report*, 1889, p. 537.

此后不久，基尔霍夫接受了英国为他的发现而颁发的奖章，而且它是用黄金做成的。当把这个奖章拿给他的财东看时，他看着奖章，并说：'看呀！我终于已成功地从太阳那里取下了一些金子。'”

我们已讲过，作为一个研究者，基尔霍夫的天才，不在于开创，而在于完成[1]。这一点在他的关于光谱分析的著作中清楚地看出来了。在他之前，许多伟大人物已经掌握了他的发现的线索。英国、法国和美国的科学家们如此相近地得到了基尔霍夫的结论，以致于长期来争论着优先权的问题。“（可是），大家都看到了一些东西，做了一些猜测，认为（没有基尔霍夫）有可能或者也许（在那时也已经知道它了）”。但是，在打下坚实的基础和得到确凿的知识方面仍然是基尔霍夫的伟大功绩。

170

有一种关于优先权的主张是倾向于剑桥的威廉·哈洛斯·密勒，人们为他争辩说，“他在将近十六年前就预料到基尔霍夫的重要发现，即某些有色火焰对它们自己的色光是不透明的。”[2]在基尔霍夫1859年的论文发表后不久，威廉·汤姆孙（即后来的开尔芬勋爵）提出了另一个主张，他倾向于优先权应属于剑桥的彭布罗克学院的**斯托克斯**（1819—1903），他在基尔霍夫之前（大约在1849年），在一次谈话过程中，这样解释了吸收线的形成：“钠蒸汽由于它的分子结构必定具有一种振动的趋势，其振动的周期相当于双D线的可折射度。因此，钠在光源中的存在肯定倾向于发出那种特性的光。另一方面，在光源周围大气里的钠蒸汽有保留自己的强烈倾向，也就是说，有吸收来自恰好是该特性的光源的光并升高它自己的温度的倾向。因此，在太阳周围的大

[1] W.Voigt, *Zum Gedächtniss von G.Kirchhoff*. Göttingen, 1888, p.9.

[2] Crookes in *Chemical News*, May 18, 1862; *Philos. Magazine*(4), Vol.25, 1863, p.261.

气肯定存在有钠的蒸汽。这样，根据力学的解释提出，这蒸汽对那种特性的光特别不透明，当那种光从太阳发射出来时，钠蒸汽就不让它穿过周围大气的较大距离。”[1] 斯托克斯没有从实验上确定钠蒸汽是否具有预期的特殊吸收力，而他想起了法国的佛科所做的一个显示这种吸收力的试验。[2] 他没有把他发表的力学理论说得多么重要。然而，威廉·汤姆孙爵士加添了这样的话："多年以来，在我的定期讲演中我提出了它，'和它一道，我总是指出，太阳和恒星的化学应当是通过研究地上的物质来研究的，这些地上的物质在人工火焰的光谱中'发出的明线对应于太阳和恒星光谱的黑线。”斯托克斯自己慷慨地发表了如下否认优先权的话："我决没有要为我自己夺取基尔霍夫的卓越的发现的任何部分的优先权的想法，并且不能不认为，我的一些朋友在我的事情上是过份热心了。”[3]

以后的光谱实验

自从基尔霍夫和本生创立了光谱分析这门科学以来，科学家们曾忙于补充理论细节，改进实验方法和扩大我们的天体化学的知识。不久就明白了，在练习从他们给出的光谱中推导物体的化学结构和物理性能一定要非常小心。混乱的现象是由那些多重光谱的出现而引起的。早在1862年，波恩的普吕克尔指出，同一物质在不同的温度下会发出不同的光谱线。他和希托夫发现了氢、氮和硫的烟有两种光谱，即一种弱的带光谱和一种明线光谱。亚琛工业学院的维尔内（1835—1908）在1868年研究了氢、氧、氮的光谱当它们在普吕克尔管中受到不同压力时的变化。[4] 对于

〔1〕 *Philos.Magazine*(4), Vol.25, 1863, p.261.

〔2〕 *L'Institute*, Feb. 7, 1849, p.45.

〔3〕 *Nature*, Vol.13, 1875, p.189,

〔4〕 *Poggendorff's Annalen*, Vol.135, p.497.

氧，他观察到在不同的压力条件下有三种光谱。当在密度较大的气体中的时候，通过普吕克尔管放电的电阻也较大，温度有可能

172 更高。因此，维尔内认为，在普吕克尔管中气体压力随温度的改变而发生变化，并且光谱的变化是由于压力和温度二者的改变而引起的。埃施特勒姆反对维尔内的这种见解，认为当温度升高时可能产生一条新谱线和当压力增加时可能使谱线加宽，然而一种光谱决不会变成另一种全新特性的光谱。[1] 埃施特勒姆把维尔内的一些结果归因为在气体中有杂质存在。可是，更加广泛的研究揭示出，光谱的变化不仅依赖于温度和压力的改变，而且还依赖于分子的结构。密切利希、克利夫顿、罗斯科和洛克耶（1836—1920）[2] 研究了分子结构的影响。洛克耶在1873年和1874年提出了这样的见解，即每一种复合物都有象是单一物一样确定的光谱；线光谱是游离原子形成的，带光谱是由分子或分子群形成的。洛克耶的理论受到埃施特勒姆的推崇，但是维尔纳反对它，维尔内在1879年[3] 做了氮的光谱实验，证明在温度逐渐变化时带光谱逐渐地成为线光谱。他论证在解释这个事实时不需要洛克耶的分子分解的理论。洛克耶观察到了线光谱（例如钙）随着温度升高的变化。于是他提出了大胆的理论：正如在带光谱转变为线光谱时可以以分子分解为原子来解它一样，由于温度的升高而发生的线光谱的变化也可以以原子被破裂为更基本的物质来解释，这样就指出了化学元素本身的复合性质。[4]

---

〔1〕 *Recherches sur le Spectre Solaire*, Upsala, 1868. 见 Rosenberger, 同19页注〔2〕Ⅲ., p.701.

〔2〕 参阅 J.N.Lockyer.*Studies in Spectrum Analysis*, New York, 1893, Chap. Ⅵ..

〔3〕 Rosenberger, 同19页注〔2〕Ⅲ., p.706. 参阅1880年斯旺西(Swansea) 会议上"关于光谱分析现况"的报告, *Robert of Brit, Ass.*, 1880; 摘要见 *Nature*, Vol, 22. p.522.

〔4〕 Lockyer, 同上. p.189.

德国人凯泽尔和龙格在1890年开始的一系列研究中表明，许 173 多元素的光谱线的分布决不是象乍看起来那样没有规则。他们发现，在普通元素的光谱中有线系。有人一度设想过，在氦光谱中存在有不止一个系的光谱线表明氦是元素的混合物；但是，将这同样的结果应用到有六个线系的氧时，就导致了可以推想得到的错误结论，这个假说就被抛弃了。

仍有疑问的是，增加压力是否谱线的宽度会增大。利文和杜瓦合作得到的理论是，连续光谱是在低压下同样气体的光谱线变宽而形成的。[1] 1895年汉弗莱斯和莫勒在约翰·霍普金斯大学的实验室里做了重要的实验。朱厄尔注意到的某些不符引导他们作了一些实验，这些实验证明，当金属弧周围的大气压力增加时，金属弧的光谱中的谱线明显地朝向红端移动。这和多普勒效应的区别是在于每一种金属和同一种金属的不同光谱系的位移都是不同的[2]。阿姆斯特丹大学的教授塞曼在1896年观察到了另一个有趣的现象，它证明了光受磁化作用的影响。在1862年法拉第考察了放在一个磁体两极间的火焰的钠线，但没有看到任何效应；塞曼利用现代装置观察到了这种变化。把一个电弧的光源插入一个含有钠蒸汽的加热管中，并把它放在电磁体的两极之间。当受到磁体作用时，就看到了稍微加宽的光谱线[3]。芝加哥大学的迈 174 克耳逊利用他的新的阶梯分光镜，表明现象还要复杂得多。例如，"当在磁场中发出辐射时所有的光谱线都是三重的。"

---

[1] W.Huggins, Inaugural Address, *Nature*, Vol.44,1891,p.373.

[2] *Astrophys.Jour.*, Vol.Ⅲ., 1896,pp.114—137; *Johns Hopkins Univ.Circular*, No.130; *Nature*, Vol.56,1897,pp.415,461.

[3] P.Zeeman, *Phil.Mag.*, Vol.43, pp.226—239; *Nature*, Vol.55,pp.192,347,参阅O.Lodge, *Electrician* (London), Vol.38,pp.568,643.

分光镜开始被广泛地应用到天体的化学分析中[1]，但它又有一种间接的应用，而且它有希望变得同样重要。望远镜不能提供给我们星体朝向我们或离开我们运动的直接证据，而现在我们手里的分光镜却是检验这种运动的工具。有关的原理是由出生在奥地利萨尔茨堡（Salzburg）的**多普勒**（1803—1853）最先在声学方面研究出来的。当他正要移居美国时，他成了布拉格实业学校数学教授[2]。他在1842年的一篇论文中，提醒人们注意这样的事实，发光体的颜色正如发声体的声调一样，肯定随着物体相对于观察者的来去运动而变化。1845年，乌得勒支（Utrecht）的皇家气象学院的院长**布依斯 巴洛特**（1817—1890）在火车旁试验，并验证了当应用于声学时这个理论的正确性。当火车飞奔而过车站时，人们听到火车接近车站时的汽笛声调比实际的更高，而在它离开车站时的声调比实际的更低。多普勒认为所有的恒星最可能是发白光，其中一些恒星的颜色是由于它们朝向我们或离开我们运动的结果。正如布依斯-巴洛特指出的一样，这个结论是错误的。向我们靠近的星体将使整个光谱向紫外区方向稍微移动一点，某些红外光变为可见外，某些紫外光变为不可见的了。颜色不可能发生变化。但是，在1848年菲索指出，通过对光谱线的考察，这种移动应当是可以觉察的。例如，如果将正在接近的星体的氢线跟实验室中氢管的那些谱线相比较时，那么，前者是朝着紫外方向移动，而后者是固定的。这个位移是如此微小，以致在设计出能精密测定这位移的仪器之前，过了许多年头都没有发现它。英国的天文学家**哈金斯爵士**（1824—1910）于1868年在这精密的工作方面作出了首创性的工作。1871年，波茨坦（Pots-

---

〔1〕 关于天体物理学史，参阅A.M.Clerke, *History of Astronomy during the Nineteenth Century*。关于分光镜文献，见 *Smithsonian Miscellaneous Collections*, Vol.32, 1888.

〔2〕 在他死之前，他是维也纳大学实验物理学教授。见F.Poske, *Zeitsch.f.d.Physik.u.Chem.Unterricht*, Vol.9, 1896, p.248.

dam)的福格尔（1841—1907)发觉了由于太阳转动的这种移动效应。以后多普勒原理被很成功地运用到一些星体的运动上，并且被福格尔、哈佛的皮克林（1846—1919）、利克天文台的基勒（1857—1900）等人应用到发现双星的工作上。以这种方法发现的有些双星彼此靠得如此之近，以致于甚至用我们的最大分辨率的望远镜观察它们时仍显得象是单个的星一样。1895年基勒得到了土星的环系不是一个坚实的整体的观察证据，因为内亮环的内边每秒移动12$\frac{1}{2}$哩，而外环的外边每秒仅移动10哩。利克天文台的W.W.坎贝尔藉助于摄谱仪把多普勒原理应用到视线方向的星体运动上，并且发现不同光谱类型的星体以不同的速度在空间中运动。这个结论被奥尔巴尼（Albany）的达德里天文台的博斯（1846—1912）、莱顿天文台的卡普廷（1851—1922）所证实。

应用光栅观察太阳光谱

有两种得到光谱的方法：一种是用一个棱镜或一组棱镜；另 176
一种是用光栅。基尔霍夫和本生用了前一种方法；夫琅和费和德雷珀在某种程度上应用了后一种方法。托马斯·杨概述了光栅（“刻有条纹的面”）的理论。在夫琅和费以后，波美拉尼亚的格赖夫斯瓦尔德（Greifswald）的光学仪器商诺贝尔特(1806—1881）对制造光栅的技术作了重要的改进。他做了一个玻璃测微计，它是用于测定显微镜的放大率，并且他为埃施特勒姆和马斯卡尔特（1837—1908）提供光栅。乌普萨拉的物理学教授埃施特勒姆（1814—1874）于1868年在他的《关于太阳光谱的研究》（Recherches sur le Spectre Solaire）中发表了一张长期来被当作标准的波长表。所有的测量都有约7千或8千分之一的误差，这主要是由于他用作标准长度的米稍短了些。[1] 埃施特勒

〔1〕 Louis Bell, “The Absolute Wave—Length of Light”, *Phil.Mag.*(5), Vol.25, 1888, p.245.

姆早在1872年就知道了这点，但他尚未做出必要的修改就与世长辞了。由他的学生泰伦所作的修正发表于1885年。埃施特勒姆表示波长的单位，即10^{-8}厘米，被命名为“埃”，并且现在已被普遍接受。1907年，这个单位被在巴黎举行的国际太阳协会的会议上重新定义为、于15°C、760毫米大气压下红镉谱线波长的1/6438.4696。由此可见，这个谱线的波长是单位波长、也是米尺的天然标准。原来根据大宇宙的天然单位（地球象限的千万分之一）定义的米现在以小宇宙的天然单位来定义。在这个例子中，证明小宇宙比大宇宙更稳定。

诺贝尔特的衍射光栅刻线方法被他作为一种职业秘密谨慎地保守起来。从他以后，美国作出了最好的光栅。约1863年，威廉学院的毕业生和律师L.R.卢瑟富德(1816—1892)对于制造光栅很有兴趣，他曾在他自己靠近纽约的私人天文台里研过天文学。在许多初步的试验以后，卢瑟富德制造了一种他自己设计的机器，并用一个小水磨带动它。“金刚钻头在玻璃板上划出许多平行线，玻璃板由一组在玻璃尖楔上作用的杠杆系统有规则地向前推动，而这个玻璃尖楔又把玻璃板往横的方向推动。”[1]线和格子的间隔除了偶然地稍有变动以外，确实是惊人的精确。根据哥伦比亚大学的鲁德的意见，他在1867年又建造了一架机器，这是用螺旋代替杠杆移动玻璃板的。通过几年的努力以后，他所制造的光栅远胜于诺贝尔特的光栅。在1875年或者更早一些，卢瑟富德为使光栅更便利地作分光镜使用而把光栅镀了银，而后，为了节省大量的金刚钻他在镜用合金上做了光栅。[2]在1877年，这种刻线机扩大了。那时在美国海岸测量局工作的皮尔斯带着卢

177

---

〔1〕 B.A.Gould, *Nat.Acad.of Sciences, Biographical Memoirs*, Vol.3, p.428.

〔2〕 详见此文，“Ruling Machines,” in *Johnson's Universal Cyclop(o)edia*.

瑟富德的最好的光栅又一次地动手解决十年前埃施特勒姆遗留下来的波长问题。[1]

在制造光栅方面，约翰·霍普金斯大学的罗兰作了第二个改进。他的注意力首先被马萨诸塞的沃尔瑟姆（Waltham）地方的**W·A·罗杰斯**（1832—1898）建造以机器来控制的刻线机所吸引。[2] 罗杰斯的目的是要产生很准确的线，以便校正光学仪器以及精密地检验显微镜的物镜。他能在每毫米内划出多至4800条线。罗兰为建造刻线机约花了一年的时间。精确的螺旋的制造是这项任务的最精细的部分。这过程是由在一个恒定倒转的长螺母 178 中拧螺丝组成的。当完成了这项工作时，虽然有九吋长，但没有半个波长的误差。[3] 罗兰发明了凹面光栅，并且是在他的机器上刻划的。因此，准直仪成为不必要的了。后来在罗兰的指导下造了第二和第三个机器，并且许多年来罗兰的光栅是无与伦比的。[4] 他作了一个很大的《太阳光谱摄影图》，全长超过了35呎。这是在1888年完成的。他制造了太阳光谱波长表，发表于1895—1897年的《天体物理学杂志》第1—6卷。这些波长的相对值是十分令人满意的，但是更近的时候L·贝尔和其他人用迈克耳逊的干涉仪的方法仔细地测定了 D_1 线的波长，发现它需要有稍微的修正，因而在罗兰表中的波长的绝对值也必须作相应的更改。罗兰给出 D_1 线的值是 5896.156Å；哈特曼在1909年给出这个值为5895.932Å；迈克耳逊选择了红镉线代替 D_1 线作为标准参考线。

---

[1] *Am.Jour.Sci.*(3), Vol.18, 1879, p.51.

[2] *Proc.Am.Acad.of Arts and Sci.*, New Series, Vol.Ⅱ., 1883—1884, p.182.

[3] 参阅罗兰的文章."Screw"，在 *Encyclop(o)edia Britannica*, 9th ed..

[4] 罗兰的传记和他的第二个刻线机设计图见 Appleton's *Pop.Sci.Month.*, Vol.49, 1896, pp.110—120.

在可见的太阳光谱前后作探索

赫谢尔（1738—1822）爵士首先证明，太阳光谱并非只限于从红到紫的可见部分，他在1800年发现太阳的红外光。在连续的色谱上放上温度计时，他发现了太阳光谱中热的不平均分布，在红端以下最热。在他之前没有一个人猜想过这样的不均等性。这179个老练的天文学家说：[1]“在自然哲学方面，对于一般被认为是理所当然的东西加以怀疑有时是大有用处的；特别是怀疑一旦产生，则消除怀疑的办法往往就随之而来了。”他讲到太阳的热是由服从反射定律和折射定律的“射线”引起的。杨在1807年的《讲演》中说，“这个发现应当被认为是自牛顿时代以来所作出的最伟大的发现之一。”然而许多物理学家和教科书的作者们在半个多世纪以内，也没有看见赫谢尔所预言的事实，但是后来被梅隆尼更清楚地确立了。赫谢尔的观点受到爱丁堡的约翰·莱斯利（1766—1832）的攻击，莱斯利是差示温度计的发明者。这个能干而认真的研究者，同一切追求真理的人一样，也犯了错误。他没有看到辐射热和光之间的类似性。他说：“那么，我们探讨的热质流和冷质流是什么呢？它既不是光，又跟以太无关，又不类似于真实的或者想象的磁流和电流。但是，为什么要求助于不可见的动因呢？有就是有。它只不过是周围的空气而已。”这样，赫谢尔的红外区的热效应被他认为是来自于光谱的可见光部分的空气流。但是，莱斯利并没有找到赞同他的人，因为戴维爵士已经证明在部分真空处的辐射要比在正常压力下的空气中大两倍，而且李特（1776—1810）和沃拉斯顿发现了紫外区不可见的化学射线。[2]在1811年一个年轻的法国人罗舍证明，在同类性质的

---

〔1〕 *Phil.Trans.*,1880,p.255.

〔2〕 Rosenberger，同19页注〔2〕Ⅲ.,p.67.

两个相继的光屏中，第二个屏吸热的比率比第一个屏小，而且他还作出了辐射热有不同类型的结论[1]。赫谢尔早先就证明了“辐射热有不同的可折射性。”

但是直到梅隆尼（1798—1854）[2]开始他的研究之前关于辐射热的知识仍没有显著的进展。梅隆尼早在童年时代就表现出 180 对科学的热爱。他“是一个天生的物理学家”，从学校毕业后就开始讲授物理学。他在帕尔马(Perma)大学教授了七年。政治上的风波把他驱逐出意大利。在法国，他与阿拉哥成了好朋友。梅隆尼接受了汝拉（Jura）省的系里的教授职务，但在1837年他被允许回到他的祖国，1839年他在自己的祖国当上了那不勒斯市(Naples)的艺市和贸易展览馆的馆长[3]。梅隆尼在1850发表了一篇巨著《热色，或者热质的颜色》（La Thermochrôse, ou la coloration calorifique），在这著作中收录了他对辐射能的研究。在绪言中他讲了他少年时热爱自然的故事，以下的引文是其中的一部分：

“我出在帕尔马，当我假日时我习惯在黑夜之前到乡下走走，并且睡得很早，以便在拂晓前起床。这时我经常静悄悄地蹓出了家门，并且跑步，心脏随之急烈地跳动，一直跑到一个小山顶上，我经常坐在那里，以便凝视着东方。”他告诉我们，他经常在那里等候着初升的太阳并欣赏那壮丽的景色。他继续讲道：“再也没有别的东西，象连结生命现象和赤日明星的纽带那样深情地令我神往，而这赤日的光束伴随着神秘的热。”[4]

为了保证辐射热研究的进展，需要有更加精密的仪器来代替

[1] S.P.Langley, *Address* before A.A.A.S.,1888,p.14.

[2] 我们是从罗森贝格尔(Rosenberger)那里引来的这些资料。玛丽(Marie)和拉鲁塞(Larousse)给定的生卒年为1801—1853.

[3] J. Lovering 的传记概略在*Proc.of the Am.Acad.of Arts and Sci.*, Vol.Ⅲ.,1857,p.164.

[4] S.P.Langley，同上.p.16.

赫谢尔的温度计。这样的一种仪器称为温差放大器[1]（themo-multiplier）或温差电堆（thermopile），它是由佛罗伦萨的教授诺比利（1784—1835）设计的，并由他和梅隆尼完成的。或多或少明确地被赫谢尔、罗奇和其他人认识到的结果之一是梅隆尼特别强调的，即辐射热具有不同的种类，热射线的多样性正如可见光线的多样性一样。被梅隆尼用隐喻称为热的颜色的现象不是用眼睛来感知的，但能够被检测出来，正如光的颜色是以棱镜的色散或以一些实验（在这些实验中某些颜色比别的颜色被吸收得更多）来检测的。梅隆尼创造了“thermochrôse”一词，意思是“热色”。他几乎达到了辐射热和光是同一的认识。他在1843年说道：“对视觉器官而言，光仅仅是一系列能被感知的热的征状，反之也一样，不发亮的热辐射可以证明、是不可见的光辐射。”[2]倘若这是正确的，则有光必定会有辐射热，因而月光就应当显示出热效应。他试做了这个实验，起初失败了，但后来却成功了。1846年在维苏威山（Mount Vesuvius）上，他用了一个直径为一米的多区域光带透镜，以及一个温差电堆和一个电流计，从月光中成功地得到了微弱的热的征状。梅隆尼做了许多固体和液体吸收辐射热的实验。他造了透热性（diathermancy）一词，对于辐射热用这个词和对于可见光用透明度（transparency）一词具有同样的意义。在他的实验中，让由灯光或其它光源发出的辐射经过空气到温差电堆；于是就看见了电流计的偏转。其次，他把要检验其透热性的物质（水、岩盐、玻璃或冰）放在光线走向电堆的路径上，然后观测指针的偏转。梅隆尼的实验似乎表明、岩盐对于各种各样的发热射线是完全透明的——而现在知道这个结论需要有某些限制。冰和玻璃最能吸收这些射线。梅隆

181

---

〔1〕 *Poggendorff's Annalen*, Vol.20, 1830. p.215; Vol.24, 1831, p.640.

〔2〕 根据兰利（Langley）的译文，同175页注〔1〕.p.18.

尼清楚地证明，不同的固体和液体具有不同的热透射率，并且透热性随着热源而改变（除了岩盐以外）。玻璃传送了39%的洛卡特利灯（Locatalli lamp）的辐射，却只传送6%的铜在400°C时的辐射。

当梅隆尼测量不同厚度的固体和液体的透热性时，约翰·丁铎尔（1820—1893）对气和蒸汽作了同样的实验。丁铎尔出生在 182 爱尔兰的卡洛（Carlow）附近。当他约二十一岁时，他到了英格兰并参加了曼彻斯特的铁路工程师组织。1847年他接受了新成立的格林伍德（Greenwood）学院的数学和测量学讲师的职务，在这个学院中是用实验来讲授科学的。约一年以后，他到马尔堡（Marburg）大学学习数学、物理学和化学。最后的学习得到了本生的指导。他朝着物理学方面发展是受到了克诺布劳赫（1820—1895）的很大影响，克诺布劳赫曾验证并推广了梅隆尼关于辐射能的工作。在1850年毕业以后，丁铎尔到了柏林，并在马格努斯实验室做了一年关于反磁性和磁-晶体作用的研究。在他回到英格兰以后，于1853年在皇家研究院做了一次讲演，这个讲演"轰动了听众。"[1]他当选为皇家研究院自然哲学的教授。这个职位通过托马斯·杨、戴维爵士和法拉第的工作而闻名于世。以后，他除在瑞士的阿尔卑斯度假期间作自然现象的观察以外，正是在这个学院的实验室中做了许多研究。他的最重要的创造性工作是在热学领域之内进行的。他具有把困难问题通俗化的非凡才能。或许他对科学的最重大的服务是通过他的一些著作：《热是运动的

〔1〕 E.Frankland，"John Tyndall"．见*Proc.Royal Soc.of London*，Vol.55，1894，p.XVIII．丁铎尔的著作"Prayer-test"见*Contemporary Review*，Vol.20，1872，pp．205—210．在这一卷里还包括了麦科什（James M'Cosh）等人的反应。丁铎尔的"贝尔法斯特的演说"（Belfast Address）是于1874年在英国学术协会报告中讲的，同时引起人们对他提出"不信奉宗教"的责备。

一种形式》、《关于光学的六次讲演》（于1872—1873年在美国讲述）、《水的形态》，等等，这些都是通俗讲演的范例。

梅隆尼从他用热电仪器做的一些实验作出结论：在18或20呎的距离内辐射热被大气所吸收是完全感受不出来的。丁铎尔以更加精密的仪器证实了这个结论：就热射线而言，干燥的空气实际上等同于真空。一般地说，单一的气体吸收辐射热量是难以知觉的。但是，丁铎尔发现，它跟混合气体不同；混合气体的吸收部分直接随他们的分子的复杂性而改变。这样，在一个分子里有十五个原子的乙醚的蒸汽吸收了相当于相等体积的最大密度的二硫化碳蒸汽（仅有三个原子组成的分子）所吸收的辐射热的100倍。丁铎尔发现，辐射率和吸收率刚好是同一个数量级。因此，氧、氢和氮不产生辐射热，而氨会显示出决定性影响。柏林的H．G．马格努斯研究了同样的课题，而且除了水蒸汽的情形以外，两个研究者的结果非常相近。马格努斯发现，水蒸汽有一点点作用或者根本没有作用；丁铎尔发现，水蒸汽对于低折射性的热射线有相当大的作用。这是气象学中的一个重要问题。这个争论一直持续了许多年。[1] 但是，1881年丁铎尔发表了一篇论文，[2] 它最终证明他的见解是正确的。那时候，A．G．贝尔通过落到密封在长颈玻璃瓶内固体上的断续光束的作用得到了悦耳的声音。用一根听管插进玻璃瓶内把声音传播到耳朵中。当光线落到听管物质上时，它就膨胀了，一个空气的脉冲就被排出。当光线被切断时，发生了相反的效应。这样一来，就产生了声音。贝尔在皇家研究院的实验室将这些实验的一部分表演给丁铎尔看，因此，丁铎

〔1〕关于这个争论的历史记载，参阅 J.Tyndall, *Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat*, London, 1872, pp.59—64.

〔2〕"Action of an Intermittent Beam of Radiant Heat upon Gaseous Matter," *Proc.Roy.Soc.*, Vol.31, 1881, p.307; *Nature*, Vol.25, 1882, pp.232—234.

尔做了充有不同气体的长颈玻璃瓶实验。[1] 他说：当长颈玻璃瓶含有潮湿空气时放入断续光束，“我听到了由水蒸汽产生的强大的悦耳的声音。我把玻璃瓶放进冷水中使它的温度从约90°C降到10°C，满以为这声音在这温度下会消失；但是，……这声音仍是既清楚又响亮。三个充满普通空气的空玻璃瓶被放到结冰的混合物中。当断续光束急速地落到它里面时，其声音要比干燥空气中所产生的要大得多。”这样一来，证明了水蒸汽有吸收作用，争论最后结束了。 184

莱斯利、梅隆尼和丁铎尔指出了一个广泛流行的关于颜色对吸收影响的错误观点。富兰克林将各种颜色的布料放在雪上并让太阳光照晒它们。这些布不同程度的吸收了太阳光，并在雪上以不同深度下沉。由此，富兰克林断定，黑色吸收最好，白色吸收最差。然而，这个概括需要加以限制。如果太阳或其它发光体所发出的辐射只包含可见光，那么，问题将会更简单些。但是，不可见光线经常产生的效应刚好与富兰克林的理论得出的预计完全相反。丁铎尔用明矾(一种白粉末)涂在精密水银温度计的玻璃泡上，用碘(一种黑色粉末)涂在第二个温度计的玻泡上，涂上明矾的温度计的温度将上升为另一个温度计的温度的两倍；明矾比碘更容易吸收，丁铎尔说：“穿在人身上的衣服的辐射完全不是人们时常设想的那样取决于它们的颜色。动物皮毛的颜色同样不会影响辐射。这些就是莱斯利和梅隆尼对于不可见的热所得到的结论。”[2]

辐　　射 185

在不高的温度下物体发出不可见的辐射，这种辐射波的振荡

[1] A.G.Bell, *Upon the Production of Sound by Radiant Energy*, Washington, 1881, p.19.

[2] J.Tyndall, *Heat a Mode of Motion*, New York, 1897, p.299.

频率太低，不足以影响人的眼睛，这是一种普通常识。但是，当固体的温度升高到525°C以上时，（根据德雷珀的意见）人们通常看到了暗红光。当温度继续升高到更高时，或许有希望在一定阶段上只看到紫外，这是一种能影响眼睛的最高频率的光。事实上，我们所看到的灯光不是紫光，而是白光。这就是说，随着温度的升高，产生的较高频率的辐射伴随着较低频率的辐射，白光是可见光谱的从红端到紫端的光线的复合的结果。问题产生了，不同频率的光线强度怎样随着温度的升高而起变化，在给定的温度下那些频率占主要地位？换句话说，在不同温度下辐射的光谱分布是怎样的？

在瑞士日内瓦的**普雷伏**（1751—1839）早已考虑过辐射的基本问题。他认为每一个物体都放出热辐射并从邻近的物体中接受这样的辐射。根据这种"交换说"，如果所有物体的温度都相同，热仍在这些物体之间进行着交换；每一个物体接收的热正如它所发射的一样多。爱丁堡（Edinburgh）的B·**斯图尔特**（1828—1887）扩展了普雷伏的交换说，他提出了在任一恒温下吸收和发射的关系的定律："一块金属板的吸收等于它的辐射，并且对每一种热的描述都相等。"〔1〕后来，斯图尔特检验了一个辐射和吸收的物体进入到包壳内的问题，这个物体和包壳起初完全处在相同的温度下。〔2〕根据多普勒原理，运动着的物体的辐射在它的前方比在它的后方会震动得更激烈。这个运动着的物体"给予包壳的射线、因此不等于物体在相同温度和静止时会给出的那些射线……，所以，包壳是接受了一组射线而放出了另一组射线。"因此，包壳的各个部分不完全处在相同的温度下。

〔1〕 B.Stewart, *Trans.Roy.Soc.of Edinburgh*, Vol.22, 1861, p.13. 斯图尔特的文章是在1858年3月9日写的。

〔2〕 *Report of British Ass'n for* 1871, London, 1872, Abstracts, p.45.

我们可以利用这些不同温度的微粒把热转换成机械运动的能量，正如在蒸汽机中一样。结果是，在包壳内机械能的总量增加了，而这是不可能的——除非我们承认有永动机的可能性。“因此，不能容许设想在这样的一个包壳内运动物体继续保持它的全部动能，结果这样一个物体的动能将逐渐消失。”斯图尔特作出结论说，在天体彼此靠近或离开时，我们可以预料到有一些机械能的损耗。自从麦克斯韦电磁理论提出以来，斯图尔特佯谬的解可以通过考虑辐射也给出压力而逼近。在1901年，俄罗斯的物理学家**列别捷夫**（1866—1911）[1]、美国物理学家**尼科尔斯**（1870—1924）[2]和G·F·赫尔，藉助于真空中的非常轻巧的镜子证明了光波能产生压力，如同光的电磁理论中所预言的一样。列别捷夫和其他人还将这个结果用以解释当彗星靠近太阳时彗尾弯离太阳的原因。在那种情况中，光压超过了引力的吸引。

斯图尔特的论文在欧洲大陆没有得到人们的注意。在那里，基尔霍夫的研究起了首要的作用。大约和斯图尔特同时，他得到了这个结论：“在相同温度下的同一波长的辐射，其发射率和吸收率之比对所有的物体都是相同的。”[3]在1860—1862年间，他发表了重要的结果。一般地说，当辐射落在物体上时，部分被反射，部分被穿透，部分被吸收。全部被吸收的情况正是在理论上特别有意义的。基尔霍夫定义了一种完全的“黑体”，这种黑体在任何温度下吸收了落在它上面的一切热辐射。灯炱不能完全满足这种假想物体的要求。基尔霍夫认识到，任何一个物体的发射率和吸收率只是绝对温度T和波长λ的函数。如果我们令

187

[1] Peter N.Lebedev. *Annal d.Phys.*, 4.S., Vol.6, 1901, p.433; Vol.32. 1910, p.411.

[2] E.F.Nichols and G.F.Hull, *Phys.Rev.*, Vol.13, 1901, p.307; *Astrophys.Jour.*, Vol.15, 1902, p.62.

[3] *Monatsber.d.Acad.der Wissensch.zu Berlin*, Dec, 1859, p.783.

$e(\lambda、T)$为发射率，$a(\lambda、T)$为吸收率，则对于任何二个物体我们都能得到这个比率：$e(\lambda,T)/a(\lambda,T)=e_1(\lambda,T)/a_1(\lambda,T)$，其中$e_1$和$a_1$是第二个物体的发射率和吸收率。对于一切“黑体”而言，$a(\lambda,T)=a_1(\lambda,T)=1$，所以$e(\lambda,T)=e_1(\lambda,T)$。这就是说，对于所有的“黑体”，热发射率都是λ和T的同一个函数，并且不取决于黑体的质料。既然对于任何两个物体其发射率和吸收率之比是相同的，我们可以取这两个物体中的一个为“黑体”，至于这个黑体的吸收率按定义为全吸收或是一。我们从而看到，任何物体的发射率和吸收率之比都是λ和T的相同的函数，而且等于“黑体”的发射率。因此，如果实验上有可能实现“黑体”的条件，那么基尔霍夫的理论结果就提示了这种实验的可能性，用这种实验可以期望从某种光推算出这个λ和T的函数的性质——这个函数已被称之为“世界函数”。

就在实验上发现“黑体”而言，基尔霍夫具有一个和斯图尔特很类似的观念。基尔霍夫建议用一个有黑色内壁的闭合盒子使它保持在恒温T中，并使这盒子有一个很小的孔，通过这个孔辐射可以从盒内到盒外。人们已经证明，这种辐射和假想的“黑体”在理论基础上是相同的。在这个辐射谱中，λ和T之间的关系的性质能够在实验上进行研究。但是，在人们充分发展起这种实验室技术之前又过了许多年。

188

兰利（1834—1906）对我们认识辐射能作出了重要的实验贡献。他出生在波士顿的罗克斯巴里（Roxbury），学习过建筑学和土木工程，在国外留学了两年之后，1865年他在哈佛天文台当助手，后来他当了海军天文台的数学助理教授，1867年当了阿勒格尼（Allegheny）天文台的台长，从1887年起直到死为止，他一直担任华盛顿的史密孙研究院院长。他是一个很沉默和孤独的人，没有结婚成家，他从事太阳的研究是由于他对我们的行星系的伟大中心的孩童般的兴趣，因为我们行星上的生命是靠了太阳。

要在辐射研究方面作出重大进展，似乎还需要发明比梅隆尼

和丁铎尔的温差电堆更精密的仪器。兰利的新设计是在1881年首次描述的测辐射热器。[1] 可以把它描述为象测量温差的精密的惠斯通电桥。一条很精细的铂丝（起初用的是铁丝）被当作电路中的导线应用。如果辐射落在它上面，它的温度就升高，并且它的电阻就增大。精密的电流计记下了电流的变动。测辐射热器能测出 0.0000001°C的温度变化，使用它的一些初步成果表明，太阳光谱中热的最大值是在橙色区，而不是在赫谢尔和其他人所主张的红外区。以前的观察者使用了容易犯以下两个重大错误的棱镜光谱：（1）棱镜吸收了部分辐射，进行了所谓“选择吸收”；（2）跟光谱的上部相比较时，棱镜集中的光线在光谱的下部，于是掩盖了热的真正的分布。在使用产生“正常光谱”的光栅以后，这些错误就避免了。多年以来，流行着这种信念（未曾得到实验的支持），即相信我们的大气正好起着温床中玻璃的作用，并且相信，它以吸收地球辐射出来的红外线而保持着这行星的温度。兰利用实验证明，这是不符合事实的。红外线比较容易穿过大气层。1881年，他在内华达山岭的惠特尼山峰（Mount Whitney in the Sierra Navadas）继续作他在阿勒格尼城作的实验[2]，这实验证明，大气的“选择吸收到了预料不到的程度，留下了大部分的蓝光和绿光。”大气不仅留下了部分的太阳辐射，而且在这种作用的过程中完全改变了它的成分。在大气抽走了更多的蓝光和绿光以后，剩余的部分才到达我们这里，并引起我们平常称为“白”光的感觉，因此，“白”光不是太阳全部辐射的总和。我们要是能达到地球的大气以上，那么显现在我们面前的太阳将是蔚蓝色的。纯属原始的太阳光与落到地球表面的辐射之间的相似之处并不胜于闪电与通过带微红色的玻璃达到我们

189

---

〔1〕 *Am.Jour.Sci.*（3）.Vol.21.pp.187—198.在同一种杂志里描述了它的以后的形式，见（4）Vol.5，1898，pp.241—245.

〔2〕 *Am.Jour.Sci.*（3），Vol.25，1883，pp.169—196.

眼睛的闪电之间的相似之处。

在维里（1852—1927）协助下，兰利做了关于月球温度的实验[1]。测辐射热器"在热曲线上给出了两个极大点，第一个极大点相当于被反射的太阳光线的热；第二个极大点（在光谱中非常低的部分）相当于从温度低得多的某个辐射源发射出来的较大量的辐射热"，也即是从月球本身的表面辐射出来的。阳光照耀着的月球土地的平均温度"很可能不会大过摄氏零度以上。"根据兰利用实验确立起来的事实可以断定，"描述不可见辐射热的曲线的极大值的位置，为辐射(固)体的温度提供了一个真正的标准。"

190

在研究萤火虫的发射时，兰利和维里证明[2]，"它可能发出了除了光本身以外没有热的光；这实际上是以天然过程实现的"；"自然界产生了这种最廉价的光，它大约只有烛光所耗费的能量成本的1/400，和仅仅耗费了电灯成本的微不足道的零头。"

兰利证明，由任何给定恒量的能产生的视觉效应按照该光的颜色而发生很大的变化。对于同一种颜色，视觉因各个人的眼睛而不同。深红色的光的感觉在知觉作用期一般需要刺激视网膜的光波能量约为0.001尔格，而绿光的感觉只要 0.000,000,01 尔格能量就能产生。换句话说，我们要看见红光的话，比需要看见绿光的能量要大100,000倍[3]。

兰利广泛地研究了太阳光谱的红外区域。德雷珀在他的1842年的照相中已在这个区域里观察到三个宽带。佛科和菲索在1846年注意到同样的问题。阿布尼船长（1844—1920）在1880年用照相制作了波长直到1.075μ 的棱镜红外光谱图。兰利得到了为这个波长两倍多的光的热效应；他用精细的铂丝一直探索波长接近于

〔1〕 *Am.Jour.Sci.*, Vol.38, 1889, pp.421—440. 这只是观念上的；完满的论述发表于 *Memoirs of the National Acad.of Sciences*, Vol.Ⅳ.

〔2〕 *Am.Jour.Sci.*(3), Vol.40, 1890, pp.97—113.

〔3〕 S.P.Langley, *Phil.Mag.*, Vol.27, 1889, p.23.

3μ，这即是近似于0.003毫米的波长的光。在这个地方太阳的热似乎是突然被隔断了。太阳光谱可见部分约从H线＝0.39μ伸展到A线＝0.76μ；太阳的不可见光谱正如兰利所探测出来的那样，从0.76μ到接近于3μ。兰利还研究了来自地球的不可见的红外辐射，并确切知道了波长比0.005毫米要大的辐射，而且有根据去估计他已测知了波长超过0.03毫米的辐射，因而，当他直接地测量了将近牛顿所知的8倍的波长时，他指出可能有更大波长的迹象[1]。鲁本斯（1865—1922）和尼科尔斯利用修改了的克鲁克斯辐射计代替测辐射热计。他们分离出并确认了热氧化锆的0.05毫米波长的射线。[2]这些波约为最短的赫兹波长的1/100。这样一来，从几千米长的赫兹波到比0.0002毫米还短的紫外射线的几乎每一种波长的单色辐射都已清楚地知道了。

毕奥研究了由李特和沃拉斯顿发现的太阳光谱中的紫外线，毕奥发现，玻璃、岩盐和石英对这些光的吸收率与它们对可见光的吸收率无关。A. C. 贝克勒尔证明，石英对这些射线特别透明，甚至于一片深色石英比明亮的窗玻璃更易透过这种射线。人们既以太阳辐射又以人工辐射对紫外区域做了研究。埃克斯纳和海希克利用了罗兰光栅在1896年以照相法研究了十一种金属的电火花光谱，并且测量了19000多条的紫外线。[3]

人们在“反常色散”方面作了许多奇异的观察。这种现象的存在首先是由塔耳波特大约在1840年发现的。这个术语是勒·鲁克斯在1862年发明的[4]。勒·鲁克斯注意到，碘蒸汽吸收了可见光谱的中间部分；并在跟其它物体作比较时，碘折射兰光比折射

---

〔1〕 *Am.Jour.Sci.*（3），Vol.32，1886，p.24.

〔2〕 *Physical Review*，Vol. IV.，1897，pp.314—323.

〔3〕 *Sitzungsberichte d.K.Akad.d.W.Wien*，Vol. 105，pp. 389—436；503—574，707—740；*Astrophys.Jour.*，Vol.5. 1897，p.290.

〔4〕 *Compt.Rend.*，Vol.55.p.126.

红光的程度小。1870年克里斯蒂安森（1843—1917）看到，樱红溶液注入到中空的玻璃棱镜时产生的颜色顺序是：紫、红、黄，而

192 不是红、黄、紫。维尔茨堡（Würzburg）的教授，在1888年以后在柏林当教授的孔脱（1839—1894）描述了氰、紫苯胺、蓝苯胺和其它物质（它们的反射色不同于它们的透射色）[1]的类似性状。他的观察并不限制在液体状态的物质。在1880年他偶然发现了钠蒸汽的反常色散。在由某些很薄的金属膜所引起的色散中，孔脱注意到了一个奇怪的事实。在金、银和铜当中，当光线从空气进入薄膜中时光线偏离了法线；这就是说，折射率变成小于1。对于金和铜，红光比蓝光偏离得更大。对于铂、铁、镍、铋，折射率约大于1，并在每个场合下，红光比蓝光的折射率更大，这表明红光比蓝光更偏向垂直线。为了这些实验制备的具有很小角度并有充分透明度的金属棱镜是用镀铂玻璃上的电解沉积物制成的。这个工作花了二年的时间，而且从2000多个当中选择了少量可用的棱镜。在这些金属中光的速度和它们的导电、导热率有密切关系；在最好的导体中光速最大[2]。这种反常色散现象在现代由克特勒（1836—1900）、赫尔姆霍茨等人所提出的色散理论中起着重要的作用。

辐射能学科的专门术语是需要加以修正的。"辐射热"这一词还在大量使用。但是，如果我们以热表示在可称量的物质中分子运动能的形式，那么这术语是自相矛盾的。那里没有分子那里就没有热。"辐射热"的现象全然不属于热科学，除非我们以有

193 异议的方式赋预"热"这一词以双重的意义，即允许它既表示以太波的能量形式也表示分子扰动的能量形式。"透热的"和"不透热"这两个术语是有毛病的，因为当我们真是探讨以太波时，

---

〔1〕 *Poggendorff's Annalen*, Vol.142, p.163; Vol.143, pp.149, 259; Vol.44, p.128; Vol.145, pp.67, 164.

〔2〕 A.Kundt, *Phil.Mag.*(5), Vol.26, 1888, p.2.

而它们在语源学上却是跟热现象有关。[1]

彩色照相术

以自然色照相的问题就象照相本身一样古老。解决这个问题的最初努力是用的化学方法。最闻名的那些实验是由埃德蒙·贝克勒尔做的，他在涂上紫色的亚氯化银薄膜的银板上成功地拍下了太阳光谱的各种颜色。但当它们在曝光时立刻就消失了。[2]

在彩色照相术的第二种方法中，使光分别通过三种不同颜色的滤光器时用三张无色底片拍下对象。从这些底片作成了三种无色的正片。然后，在每一个正片上染上相当于在得到它的底片时所用的光的颜色。把彩色的正片叠起来，并以透射光来观察它们，那就看到了处在自然色中的所拍照的对象。这个方法是麦克斯韦建议的，他把它作为托马斯·杨的视觉理论的自然推广。杨认为，视网膜所感觉到的主要颜色是红、绿和紫。在法国克罗斯利用过这种方法，与此同时（1869年）迪奥隆也用过这种方法。德国人认为，这种观念的优先权是属于邦斯特滕的。约利对这种方法也曾作过改进。[3]

巴黎的**李普曼**（1846—1921）发表了第三种方法，它利用了光的干涉[4]。把透明的照相薄膜放在与水银层接触之处。水银的反射光和入射光干涉从而在薄膜中形成驻波。为此将薄膜分成几个等距的平行于玻璃面的薄层。使这些层之间的距离是入射光的波长的一半。它们起了反射面的作用，并在适当的角度上看时 194

[1] 关于辐射能名称的讨论，见 *Nature*, Vol.49, 1893, pp.100, 149, 389.

[2] L.Weiller in *Pop.Sci.Monthly*, Vol.45, 1894, p.539.

[3] *Nature*, Vol.53, 1896, p.617；参阅 E.J.Wall, *The History of Three—Color Photography*, Boston, 1925.

[4] *Nature*, Vol.53, pp.617, 618.

就显出颜色。这样，如果在任何一点上的这些薄层是由紫光形成的，它们将只反射紫光。指出这一点是有意义的：即李普曼根据风琴管发出的基音只取决于它的长度，通过把风琴管的声学性质借用到光学的领域的努力而导致了这些实验。

作为长度标准的波长

把一些特殊光线的波长采作“长度标准”的新奇思想是在1829年由法国人巴俾涅(1791--1872)[1]首先提出的。光的波长被假定为常值。实现这个计划的初次尝试是由C·S·皮尔斯和L·M·卢瑟富德共同提出的[2]。迈克耳逊和莫雷更进一步地实际上实现了这个方案，他们在1887年建议将钠光的波长作为标准，并为了用波长来决定米的长度而解释了他们的推理上的比长仪。[3]后来又尝试了用绿色的汞光代替钠光[4]。1892年迈克耳逊接受邀请，带上了他的仪器从克拉克大学到了巴黎，为的是将新的国际标准米尺与红镉线的波长作比较，由于发现了它的很大的均匀性，因而认为它比起别的光来更可取。这个精细的工作是在德布勒蒂尔馆（Pavillon de Breteuil）进行的。[5]这样，米制的基本单位可以“用比较两个标准米尺得到的相同近似程度米和自然单位相比较，这个自然单位仅仅取决于振动原子和宇宙以太的性质；正因为如此，它很可能是整个自然界中最恒定的尺度之一。”迈克耳逊发现，在15°C和760毫米大气压下红镉线的波长为6438.4722Å；1907年，法国物理学家伯努瓦、法布里、珀罗发现红镉线的波长为6438.4696Å。

195

[1] Rosenberger，同19页注[2]Ⅲ.，p.193.

[2] *Nature*, Vol.20, 1879, p.99.

[3] *Am.Jour.Sci.*, Vol.34, 1887, pp.427—430.

[4] *Am.Jour.Sci.*, Vol.38, 1889, p.181.

[5] *Compt.Rend.*, Vol.116, 1893, pp.790—794; *Astronomy and Astrophysics*, Vol.Ⅻ., 1893, pp.556—560.

人的眼睛

从前，人们曾普遍地相信，人的眼睛是如此完美的光学仪器，以致没有一个人的手所做的东西能跟它匹敌。主要是由赫尔姆霍茨作出的对于眼睛作用的实际考察引起了这些观念的变化。他说："现在，这样说是不会觉得过份了，如果有一个光学仪器商要卖给我一个具有〔眼睛所有的〕全部缺点的仪器，我会认为，我自己以最激烈的言辞责备他的粗心大意并且退还他的仪器是十分正当的。"〔1〕这个说法得到如下的一节引文的支持〔2〕："一个不完美的椭圆形折射面，一个聚焦不好的望远镜，它不能够给出一个单个的发光点作为一个星的像，除非是根据这个折射面和折射介质的安排，得到椭圆形的、圆形的或线状的像。现在，随着人的眼睛使它聚焦，一个发光点的像甚至是更不精确；因为它们是不规则的发光。这原因是在于晶状体的构造，它的纤维是沿着六条发散的轴排列成的，因此，我们看到的在星星周围的和别的远处的灯光的光线是由我们晶状体的辐射状结构所形成的像；196 这种光学缺陷的普遍性被任何带有称为'星形'的发散光线的图形所证明。居于同样的理由，月亮当它的月牙形还是很窄的时候，对许多人而言，却表现为双倍或三倍那么大。"直到法国的外科医生桑松第一次通过瞳孔从晶状体两个表面观察到了非常微弱的光反射以前，眼睛调节它本身以观察各种距离的物体的机制是一个很大的谜。拉根贝克发现，这个反射在调节作用期间发生了变化。赫尔姆霍茨和其他人通过这种变化研究晶状体的改变，并得到这样的结论：眼睛以捷肌的挛缩调节它本身，从而减少了晶状

〔1〕 H. von Helmholtz, *Popular Lectures*, trans. by E. Atkinson, London, 1873, p.219.

〔2〕 同上. p.218.

体的应力，并且它的表面（主要是前面的一面）变得比当眼睛在休息时更加突出，近物的像因而就落到视网膜的焦点上。[1]

赫尔姆霍茨无礼地揭示了这样的事实，即，不管怎么样，在蓝色眼睛里并没有真正的蓝色物质；最深蓝色的眼珠除了混浊的介质外也没有别的东西。其光学作用就象在深色背景前的烟所显出的蓝色一样，虽然，烟的微粒本身并不是蓝色的；或者按照牛顿、斯托克斯和瑞利[2]对于天空的看法，通过悬浮在空气中的极微细尘埃的作用，天空才显出蓝色。[3]当太阳光照射时，这些尘埃反射了较大部分的较短波长的带色的光，同时透射了较大部分的较长波长的带红色的光。

赫尔姆霍茨和麦克斯韦实验过由混合颜色所产生的效应。黄光和蓝光的混合产生了灰色的光而不是绿光，这可能是福布斯首先指出来的。[4]

197

〔1〕 H.Helmholtz, *Popular Lectures*, trans.by E.Atkinson, London,1873,p.205.

〔2〕 *Phil.Mag.*, Vol.41,pp.107,275.

〔3〕 J.杜瓦把天空中的蓝色归因为空气中的氧，液化了的氧是蓝色的。

〔4〕 L.Campbell and W.Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell*, London,1882,p.214. 麦克斯韦"对他的堂妹和伯母等人，喜欢坚持认为蓝和黄是不能混成绿的真相。我记得他还对我〔即L.Campbell〕解释过颜料和颜色之间的差别"（第198页）。当麦克斯韦有时以转动混合颜色时，他通常用他在1862年做成的"色盒"。"一束太阳光被棱镜分成许多种颜色，用带有狭缝的滤光器选择某些色光。以透镜聚集这些色光，并以另一个棱镜恢复它的光束的形式，然后再用眼睛直接地看到它们"（第334页）。当他在国王学院任教授时，他住在肯辛顿(Kensington)的花坛宫(Palace Gardens Terrace)8号，"在这里，他在整个房屋长的大顶楼上进行了许多实验。当用色盒正在窗户旁试验时（色盒涂上黑色，将近8呎长），他使他的邻居感到惊奇，他的邻居以为他发了疯，竟然花了这么多的时间死盯着一个棺材。"（第318页）

关于发光以太的理论和实验

从菲涅耳时候起，十九世纪的大多数物理学家相信光以太的存在胜过相信物质的存在。在假设以太的始终如一的性质方面仍然遇到许多困难。在解释光的偏振时，菲涅耳和杨不得不假定光波有相对于传播方向的横向振动，因而，这就必然要求一种弹性固体的以太，因为类似于空气的弹性流体只允许有纵向振动。但是，如果这以太是一种弹性固体的话，行星怎么能够运动毫无阻碍地通过它呢？行星在它们的运转过程中会不会减慢？多少世纪以来的天文观察证明没有这种减速的迹象。斯托克斯和开尔芬提出了这样的解释：以太就象是鞋匠的擦线蜡，它会在激烈的打击之下发生振动，但又会是塑性的并允许一个重的圆形物体穿过它缓慢地运动。有一个时期，到格拉斯哥参观开尔芬演讲的人曾看到鞋匠的擦线蜡实验。在这实验里，从上面来的铅弹和从下往上的木头立方块正在挤出它们的路程，正如他所设想的地球通过以太破浪前进一样。[1]为了解释布拉德莱的光行差，菲涅耳假定，望远镜随地球一起以不扰动以太和以太中的波动而通过空间的运动。如同解释光在密介质的速度减少一样，菲涅耳假定，以太静止在自由空间和不透明物体中，而在运动着的透明体内以物体的速度的 $(n^2-1)/n^2$ 的比率运动，其中 n 是折射率。但是，如果以太在黑色物体通过它时一点也不运动，光波怎么会引起被称之为热的分子运动？分子运动又怎么能够引起以太中的振动？1845年，英国剑桥的斯托克斯（1819—1903）修改了这个假说，他假定接近地球表面的以太是完全被地球顺着拖曳，而更高层的以太仅仅是部分被拖曳，并且“在离地球不大的距离处，它是静止在空间之中。”[2]斯托克斯的理论产生了湍动的以太，在解 198

〔1〕 *Science*, Vol.60, 1924, p.150.

〔2〕 G.G.Stokes, *Phil.Mag.*, 3.S., Vol.27, 1845, p 9—15.

释布拉德莱的光行差和垂直光线的直线路径方面它不是很成功的。洛伦兹对瑞利勋爵表示了他的异议："斯托克斯先生加诸于以太运动的条件是彼此不相容的。"[1] 总而言之，物理学家们倾向于不跟着运动物体一起漂移的自由以太。可是，1881年迈克耳逊开始以直接的试验检验以太究竟是静止的还是运动的。他在德国的时候，实验是在柏林物理研究所做的，而后为了更安静，又在波茨坦的天体物理观象台的地下室做了实验。从中都没有看到以太的漂移。但是，实验不是结论性的，而它的数学处理也需要修正。瑞利勋爵也是少数感兴趣者之一，他写信给迈克耳逊，鼓励他作进一步的实验。1887年3月6日，迈克耳逊从俄亥俄州的克利夫兰（Cleveland）答复道："我决不会对我在波茨坦的实验感到完全满意，甚至还考虑到洛伦兹指出过的修改意见……。我反复地试图引起我的科学界的朋友对这个徒劳无益的实验的兴趣，我从不发表修改意见的原因（我对于承认这一点感到渐愧）是我因工作不受重视而灰心，可是，你的来信又一次点燃了我的热情，并促使我立刻开始这项工作。"[2]

199

1887年，迈克耳逊和西部预科大学化学教授莫雷（1838—1923）在俄亥俄州克利夫兰的凯斯应用科学学院（the Case School of Applied Science）完成了现在闻名的实验[3]，按照那时作出的解释，这个实验指出地球完全地或几乎完全地拖曳着以太，"如果只考虑到地球的轨道运动，地球和以太的相对运动可能少于地球轨道速度的六分之一而且肯定少于四分之一。"这个实验在物理学家当中引起了惊愕，格雷兹布鲁克在1896年高喊

---

〔1〕 瑞利的儿子斯特拉特（瑞利第四男爵）（R.J.Strutt, Fouth Baron Rayleigh）撰写《斯特拉特，瑞利第三男爵》（J.W. Strutt, Third Baron Rayligh）, London, 1924, p.346.

〔2〕 同上. p.343.

〔3〕 Michelson and Morley, *Silliman's Jour.* 3.S., Vol.34, 1887, p.333.

道："我们还期待着第二个牛顿给我们一个将要包括电和磁、光辐射、而且还可能包括万有引力在内的以太理论。"[1]开尔芬在 1900 年讲过"两朵乌云"[2]，它们掩蔽了"把光和热断定为运动形式的动力学理论的美丽和明晰。"这两朵乌云之一正是未能解释的迈克耳逊和莫雷的实验。

热　学

热　质　说

致力于推翻热的热质说的第一个杰出的物理学家是本杰明·汤普森，即伦福德伯爵（1753—1814）[3]。他出生在北沃布恩（North Woburn）地位较低的新英格兰的家庭，它距离另一个伟大的本杰明——富兰克林的家乡不到两哩。这两个人从未见过面，但他们在物理学研究方面都取得了很大成就。本杰明·汤普森童年时就显出了对研究的爱好。在他的一本破旧的笔记本中有如下记录："我为做一个电机而做的工作记录。二天或三天的工作是做轮子。半天的工作做一个小的导体模型。做一个静电计的模型。"他曾经从沃布恩到剑桥走 8 哩路去听哈佛学院约翰·温思罗普教授关于自然哲学的讲演[4]。在他19岁时，他曾在威

200

〔1〕 R.T.Glazebrook, *James Clerk Maxwell*, New York, 1896, p.221.

〔2〕 Lord Kelvin, *Phil.Mag.*, 6.S., Vol. 2, 1901, p. 1, 2.

〔3〕 G.E.Ellis, *Memoir of Sir Benjanmin Thompson, Count Rumford*. 他和他女儿的谈话被波士顿美国艺术和科学院发表在伦福德全集的一个版本中。

〔4〕 伦福德伯爵后来给这个学院奠定了教授职位的赠款，作为对资助者的答谢，因此他在这个学院享受了用他的名字命名的该教授职称。参阅，同上，p. 36.

尔明顿（Wilmington）地方教书。在革命战争爆发时，汤普森似乎倾向于保守党；他因被人怀疑为他的国家的一个敌人而受到查验；并曾在沃布恩被逮捕和监禁。然而，从没有发现确凿的和直接的证据证明汤普森做了任何不友好的行动，或者甚至是他的这种性质的任何言论。[1] 在22岁时，汤普森逃到英国，留下了他的妻子和女儿在美洲。就我们所知，他甚至于从未写过信给他的妻子。在这个杰出的科学家身上，“看来理智的生活干扰了感情的生活。”他曾一度站在英国一边参加过战争。

在1777年，他通过研究不同物质的内聚强度而开始了他作为一个实验科学家的生涯。第二年，他成为皇家学会的会员。由于他对于军队生活有强烈的爱好，因此，1783年他离开了英国，在那201 个意在反对土耳其人的战争中与奥地利人一起服役。因为战争并未爆发，所以他在为巴伐利亚选帝侯（Elector of Bavaria）服务，并在1790年取得巴伐利亚选帝侯给他一个伯爵的爵位。他建立了工业机构、工业学校，在慕尼黑创办了军事学院，同时继续他的物理学研究。[2] 在1799年由于选帝侯去世，伦福德到了伦敦，他在伦敦为传播应用科学知识创办了皇家研究院。有意思的是，当皇家研究院由一个美国人创办时，在华盛顿的美国史密孙研究院却是由英国人发起的。1803年伦福德到了法国，并跟化学家拉瓦锡的寡妇结了婚。过后不久又离婚了。他死在靠近巴黎的奥特伊尔（Auteuil）。

他的各种各样的实验之中，在1798年发表的关于摩擦生热的

---

[1] *Memoir of Sir Benjamin Thompson, Count Rumford*, p. 58.

[2] “他在生产廉价的和有营养的食品方面的劳动必然使伦福德注意到火炉和烟囱管道的问题。当他在伦敦出版他的《论文集》（Essays，1795—1800，4卷本）时，他公布了他所有的不少于500个的各式各样烟囱。”——John Tyndall, *New Fragments*, New York, 1892, p. 123.

那个实验是最有意义的。当他在慕尼黑从事于大炮的钻孔工作时，他对于所产生的热感到很惊奇。那里来的这个热？它的本质是什么？他配备了一套仪器，以便用钝钢钻的摩擦所产生的热来使一定量的水的温度升高。在他第三次实验时，[1] 水的温度在一小时内升高到107°F；在一个半小时内升到 142°F；“在两小时又三十分钟时水实际上沸腾了！”伦福德说：“在看到这么大量的凉水（$18\frac{3}{4}$磅）在没有任何火加热的情况下被加热、并实际上沸腾起来，那些旁观者的面目上表现出来的惊讶诧异是难以形容的，……而我也坦率承认，它使我感到孩童般的喜悦，假如我有猎取一个伟大的哲学家的声誉的雄心，我应当最肯定地去隐匿这种喜悦而不是显示出来。”摩擦产生的热源“看来显然是取之不尽的。”他从这里作出的推论使他得出热不是物质而是来自 202 运动的结论，但他没有把它看成是绝对的结论性的，这是因为没有充分地以精确测量为根据的缘故。他说：“几乎没有必要作补充的说明，如果一个孤立的物体或物体系统都能连续地无限止地供出某种东西，那么这种东西不可能是一种质料性物质；任何东西，如果它能够象热在这些实验中那样被激发并传递，那么，除非它就是运动，否则，在我看来就极端难以（如果不是完全不可能的话）形成任何明确的观念。”

1804年，伦福德写了一封信给日内瓦的M·A·皮克泰特：“我相信，我将要活到足够长的时间，直到高兴地看到热质跟燃素一起埋葬在同一个坟墓之中。”这个希望是很难实现的。因为在此以后的近半个世纪中，绝大多数的物理学家和化学家仍然相信热是一种物质。

伦福德自己感到，在他的摩擦生热的实验中，他的定量工作远不如定性工作彻底。他讲到没有估计在盛水的木盒中积存的

---

[1] 美国艺术和科学院出版，*The Complete Works of Count Rumford*, Boston, Vol. Ⅰ., pp. 481—488

热，也没有估计到在实验中发散的热。从伦福德的资料中我们可以约略地估计到热的动力学平衡。他估计了水的热容量和热容量相当于26.85磅水的金属的热容量。用一匹马在2.5小时内产生的热足够使水的温度从33°F升高到212°F。因此，温度增加率是每分钟1.2°；每分钟所产生的热量是1.2×26.58卡，或是31.92卡，这个数字应当等于一个马力，或者等于每分钟33,000呎磅的功。因此，用华氏度数计算的话，一卡的热等于1034呎磅的功。焦耳的估计是772呎磅的功。

伦福德关于热的性质的结论受到了热质说者的强烈攻击，然 203 而在1799年戴维爵士却完全地证实了它。[1] 他用钟表装置使放在空气泵真空中的两种金属（轮子和盘之间）之间产生摩擦。虽然容器的温度是维持在冰点以下，但盘上的蜡却已溶化了。他还用摩擦使放在露天的、周围温度为冰点以下的冰溶解了。他从这里作出结论，摩擦引起了物体微粒的振动，而这种振动就是热。但是，他没有象伦福德那样深信这种观点的正确性，直到1812年他才感到有把握主张“热现象的直接原因是运动，它的交换定律恰如运动交换定律一样。”[2] 通过对伦福德实验的验证，杨于1807年在他的《自然哲学》一书中提出了对热质说的驳斥。但是，在那时候，除了伦福德、戴维和杨以外，其他很少人改变自己的观点。[3]

精密的计温学

与精密的计温学有关的重要观察是1822年由弗洛热格斯公布的，[4] 他观察到玻璃温度计中水银的冰点逐渐变化。当从高温

[1] H.Davy 的 *Complete Works*, Vol.Ⅱ., p.11.

[2] H.Davy, *Elements of Chemical Philosophy*, p.91.

[3] 详见 C.Berthold, *Rumford und d.Mechanische Warmetheorie*, Heidelberg, 1875.

[4] *Ann.de Chimie et de Physique* Vol.21, p.333.

冷却时玻璃不会立即恢复到它的原有容积。在整个时间过程中玻璃泡的容量有些减少，起初减少得相当快，然后在以后若干年当中都减少得很慢。这个性质是给要很精密地测定温度的人们带来数不清的麻烦的根源。焦耳在三十八年的时期中考察了一个精密温度计的"零点读数"，其结果如下：1844年4月，0°F；1846年2月，0.42°F；1848年1月，0.51°F；1848年4月，0.53°F；1853年2月，0.68°F；1856年4月，0.73°F；1860年12月，0.86°F；1867年3月，0.90°F；1870年2月，0.93°F；1873年2月，0.94°F；1877年1月，0.978°F；1879年11月，0.994°F；1882年12月，1.020°F。[1] 在欧洲所进行的关于玻璃的研究，结果发现了一种原料可以使平常的玻璃避免许多缺陷，而且水银温度计的准确性增加了五倍。[2] 耶拿（Jena）的维贝和朔特证明，要末只含钠，要末只含钾，但不同时含有钠和钾的玻璃使零点的位移为最小。[3]

204

为了精密研究的需要，人们推荐铂温度计。[4] 它们是用精密的铂金丝线圈和比较低电阻的铅丝焊接而成的。线圈和铅丝应当适当地绝缘，并把它们支架起来。它是西门子电高温计的一种改进样式。铂金温度计在相当的程度上避免了零点的变化。它以它的电阻的变化表示温度，在相同的温度下电阻的变化总是近似相同的。[5]

---

〔1〕 J.P.Joule, *Scientific Papers*, p.558.

〔2〕 *Nature*, Vol.55, 1897, p.368.

〔3〕 *Nature*, Vol.52, 1895, p.87.

〔4〕 H.L.Callendar, *Phil.Mag.*(5), Vol.32, 1891; E.H.Griffiths, *Science Progress*, Vol.Ⅱ., 1894—1895, "The Measurement of Temperature".

〔5〕 详细情形参阅，"Metals at High Temperatures," *Nature*, Vol.45, 1892, pp.534—540; "Long-range Temperature and Pressure Variables in Physics," *Science*, N. S., Vol.Vi., 1897, pp.338—356.

1815年，杜隆和珀替首次仔细地比较了水银温度计和空气温度计。[1] 他们假定各个水银温度计彼此都是相一致的，因此对一个水银温度计认真作出的校正表是对所有温度计都适用的。勒尼奥证明，事情并非如此。[2] 各种不同的玻璃不仅有不同的膨胀系数，而且它们还有不同的膨胀规律。更有甚者，I. 皮埃尔证明[3]，用同样一块玻璃同样认真做成的两个水银温度计，彼此不会精确一致。勒尼奥证明，在 0°和 100°C 之间，空气温度计和普通软玻璃的水银温度计非常接近，虽然空气温度计的中间刻度落后于另一种温度计约0.2°左右。在约 250°C时，水银温度计的读数要高得多；在300°C时，差别是 1°；在350°C时，差别是 3°。奥尔舍夫斯基证明，在低温情况下，氢温度计还是十分可靠的；当－220°C时，它们的误差不大于1°。在作精密计温术的最认真测量的那些人中，罗兰等人进行了关于热的机械当量的测定。

205

关于温度问题有一个时期在第一流的物理学家的心目中存在着相当的混乱，而且这种混乱仍然还存在于我们的一些教科书中。据说，水银温度计的优点是水银"均匀地膨胀"，或者说空气温度计的优点是空气"均匀地膨胀"或"近似均匀地膨胀"，然而被认为用来确立这种均匀性的参考标准还未给出。事实上，我们可以取任何一种物质作为标准，然后就把那种物质的相等增量定义为温度的相等增量。但是，若以水银为标准物质，然后就断言水银"均匀"膨胀，这就武断了。水银给我们以温度的任何标度，大概不同于其他各种物质的类似标度。如果水银是任定的

---

[1] *Ann.de Chimie et de Physique*, Vol.2, 1815, pp.240—254；再版于 Ostwald's *Klss.*, No.44, pp.31—40.

[2] *Ann.de Chimie et de Physique* (3), Vol.5, p.83; *Ostwald's Klass.*, No.44, pp.164—181.

[3] *Ann.de Chimie et de Physique*(3), Vol.5, 1842, p.427.

标准，则空气就不是完全均匀地膨胀，反之亦然。开尔芬勋爵是最先对这个问题有清楚概念的人之一，他在1848年建立了温度的“绝对热力学温标”，[1] 它不依赖于任何一种特定物质的特定性质，因此，为温度计构成了一个比任何任定温标要好得多的基础。这是现在我们的最终的参考温标。空气温度计所给出的读数 206 很近似于绝对热力学温标。

关于热流的数学理论

傅里叶（1768—1830）对热在固体中传播进行了数学研究，他在1822年发表了一篇题为《热的分析理论》（La Théorie Analytique de la Chaleur）的著作，这不仅是数学物理学历史上的划时代著作，而且还激起了实验研究。傅里叶假定物质的热传导率在任何温度下都是常数。但是爱丁堡的教授**福布斯**（1809—1868）证明这个结论并不真实，从0°到100°铁的热传导率减少了15.9%；而铜的热传导率减少了24.5%。他注意到同时还伴随着电传导率的减少。

气体定律、气球上升

在十九世纪初，气体定律得到了充分的研究。阿蒙顿对空气在定压下的膨胀系数得到了一个近似值，但是在十八世纪大约有二十个物理学家作了测量，彼此间差别很大。正如我们现在知道的，第一个推出这个定律的是**查理**（1746—1823），他是巴黎艺

[1] William Thomson, *Proc.Cambridge Phil.Soc.*, 1848.还可以参阅他的文章："Heat", in *Encycl. Brit.*, 9th ed. 关于"Kritik des Temperaturbegriffes"，见 E.Mach, *Principien d.Wärmelehre*, Leipzig, 1896, pp.39—57.

术和应用技术学院（Conservatoire des Arts et Métiers in Paris）的物理学教授。他发现了闻名的“查理定律”或“盖-吕萨克定律”。查理没有发表他的成果，盖-吕萨克只是偶然地知道了这些结果。盖-吕萨克的研究发表于1802年[1]。他把在较早时候的实验结果缺乏一致性归之于潮湿的存在。盖-吕萨克自己的尽心研究导致他断定：“一般地说，所有的气体在同样的条件下在受相同的热时以完全相同的比例膨胀。”

207

查理的气体研究的实用方面与气球的设计有关。他因在这个领域中所作的改进和作为一个勇敢的空中飞行员而十分闻名。在他的建议之下，一种新的气体氢气（是1766年卡文迪许发现的）被用来灌注气球。1773年，蒙戈尔费兄弟在法国南部的昂诺内（Annonay）升起了第一个气球，因而引起了巨大的轰动。他们用的是热空气。在机械师罗伯特的帮助下，查理在1783年从巴黎的练兵场升起了第一个氢气球。后来，他和罗伯特一起乘氢气球上升。乘气球上升也吸引了盖-吕萨克的注意。

盖-吕萨克（1778—1850）曾在综合技术学校念过书，当过化学家贝尔托莱的助手，后来是索尔邦（Sorbonne）物理综合技术学院的化学教授。他的物理学研究主要是有关气体的膨胀。为了弄清高层大气的化学和电的情况，也为了测量高空的地磁力，他和毕奥乘上了拿破仑出征埃及时留下的气球。“科学上的航行者带上了配套的气压计、温度计、湿度计、静电计、以及测量磁力和磁倾角的仪器、还有伽伐尼实验中的青蛙、昆虫和鸟，在1804年8月23日乘上了气球。他们在6500呎的高度上开始实验，并继续实验直到13,000呎的高度，成功地实现了他们的愿望。这次航行的最后部分，特别是他们的着陆是这样的困难……，以致于……那个很活跃而且并非缺少勇气的毕奥，被他们降落的

[1] *Annales de Chimie*, Vol. 43, pp. 137—175; *Ostwald's Klass.*, No. 44, pp. 3—25.

惊险吓得一度完全失魂落魄、不能自制。”[1]盖-吕萨克在同一年做了另一次气球航行。发现被装在瓶子里的6300米高处的空气 208 和近地球表面的空气有同样的组成。

化学原子论的伟大奠基者、曼彻斯特的**道尔顿**(1766—1844)也研究过气体的膨胀。[2] 他的结论和盖-吕萨克不完全相同。后者证明，用一个水银温度计，每膨胀一度都是在一些任意选定的温度下的体积的恒分数。另一方面，道尔顿断言，每升高相等的温度时体积的增量是预先时刻的温度下的体积的恒分数。这个问题是由赞成盖-吕萨克的杜隆和珀替确定的。[3] 由盖-吕萨克和道尔顿测定的从0°到100°之间膨胀系数的值为0.375；1837年乌普萨拉（Upsala）的吕德伯（1800—1839）教授的测定值为0.365；马格努斯和勒尼奥测定的值为0.366和0.367之间。关于气体膨胀的整个问题以上述最后两个实验家的更精密的方法独立地重新进行了研究。

我们暂且先看看刚才提及的那些人。**珀替**（1791—1820）是巴黎综合技术学校的物理学教授。**杜隆**（1785—1838）在1820年以后的若干年间担任了同样的职务。起初杜隆行医，然而他不仅免费给穷人看病，而且还为他们买药。他发现他的职业太费钱了。作为一个物理学家，他的财富全部花费在购买昂贵的仪器上。[4] 他的大部分研究都是和其他人合作进行的。有一些研究是跟珀替一起作的；另一些研究是跟阿拉哥、柏齐里乌斯、迪斯普雷兹一起作的。**勒尼奥**（1810—1878）是里昂的教授，以后又是巴黎综合技术学校和法兰西学院的教授。1854年以后，他是塞 209

---

[1] *Proc. of the Am. Acad. of Arts and Sci.*, Vol. VI., p. 20.

[2] 参阅 H. E. Roscoe, *John Dalton and the Rise of Modern Chemistry*, 1895.

[3] *Ostwald's Klass.*, No. 44, pp. 28, 40.

[4] Rosenberger, 见19页注[2]目., p. 221.

夫勒（Sèvres）瓷器厂的厂长。他在进行仔细的测量工作时表现出惊人的毅力和技巧。他的关于弹性流体的膨胀、关于蒸汽的弹力、关于水的蒸发热、关于水在不同温度下的比热等数据表都是属于第一流的。但他缺少创造的才能，而有这种才能的人不仅能够做实验而且能够把握理论科学上的重大问题。勒尼奥证明了所有的气体不具有完全相同的膨胀系数，除了氢以外，它们都随初始压力的增加而增加，没有一种气体严格地服从波意耳定律。[1]

勒尼奥的实验证明，除了氢以外的所有气体，压力和体积的乘积 pv 随压力增加而减少。如果按照波意耳定律，这个乘积该是常数。勒尼奥的观测被推广到一个比较小的压力范围。在这范围以外，随着p的增加，pv在任何压力下都不减少，而是达到一个极小值，而后再增加，就象氢气那样，这是首先被维也纳的医生纳特尔在1850—1854年间证明的，[2] 他当时正致力于液化氧、氢和空气的工作。这个有意义的观测二十多年没有得到扩展。1870年凯特勒（1832—1905）和在以后的阿马加特（1841—1915）又才捡起了这个课题。以后的实验是特别富有教益。[3]

210 当压力从30增加到320个大气压时，氢的 pv 连续地增加；氮是先

〔1〕 勒尼奥的三篇和马格努斯的两篇关于气体膨胀的论文，被再版于*Ostwald's Klass.*, No.44. 勒尼奥的最有价值的实验结果被收集在法国科学院的Mémoires, Vol.21,26. 在普法战争结束时，勒尼奥又回到他的塞夫勒实验室，他发现了他最后的关于伴随气体膨胀的热现象的伟大研究成果已被销毁，而这是他从600多次的观察中得到的。此项损失的声明就是他给科学界的最后通知。他的一个儿子是一个有发展前途的艺术家，但死在战场上了。见*Nature*, Vol.17, 1878, pp.263—264。

〔2〕 *Pogg.Ann.*, Vol.62, p.139; Vol.94, p.436.

〔3〕 E.H.Amagat, *Ann.de Chimie et de Physique*(5), Vol.19, 1880, p.435. 以及在同一期杂志上的其它文章。他的著作概要是在普雷斯顿(Preston)发现的, *Theory of Heat*, London, 1891, pp.103—110. Ostwald, *Lehrb.d.Allgem.Chemie*, Vol.1., 1891, pp.146—159.

稍微减少然后（在17.7°C）才有所增加；乙烯和二氧化碳起先是大大地减少，然后又急剧地增加。pv在临界点附近的一些变化很快；它们在低温的情况下就更为显著。

气体的液化

第一篇关于气体液化的重要著作是法拉第完成的。[1]他的实验开始于1823年，这个实验证明，可以被液化的能力是大多数气体的共同性质。取一根弯曲的玻璃管；把加热时就能分解出要试验的特定气体的物质放进它的较长的被密封的一端。然后，密封玻璃管的较短的一端，并把它放在冰冻的混合物中冷却。当较长的一端加热时，就产生了气体，管中的压力也增加了，在大多数情况下气体就在玻璃管的较短的一端凝聚。这样，加热碳酸氢钠时就得到了碳酸气，它在较短的一端被液化。法拉第用这种方法液化了H_2S，HCl，SO_2，C_2N_2，NH_3，Cl_2。蒂洛勒尔在1835年产生了大量的液态和固态CO_2。在把固态的CO_2和乙醚混合时，他得到以前梦想不到的低温。尽管蒂洛勒尔、纳特尔和法拉第在1845年作了许多研究，但有几种气体仍然抗拒被液化。它们被划分为所谓“永恒气体”一类，这个名称一直沿用了四分之一世纪，即到1877年才被取消。

同时，关于物质的气体和液体状态的连续性的一些新情况也被弄清了。早在1822年，后来在巴黎的内政部任专员的工程师卡尼亚尔-拉图尔（1777—1859）观察到这样的现象：当他把密封玻璃管加热时，乙醚、酒精和水明显地整个地变成为蒸汽，并且这

[1] 在法拉第之前，有几种气体已被冷却液化：马隆液化了氨；蒙日和克劳特液化了亚硫酸；诺思莫尔液化了氯气（在1805年）；斯特罗迈耶液化了三氢化砷。见Ostwald，同上，Vol.I.，p.294；*Nature*，Vol.17，1878，p.177.

蒸汽的体积是原始液体体积的两倍到四倍。但是，液体和气体状态连续性的发现是属于安德鲁斯（1813—1885）的，他是贝尔法斯特（Belfast）学院的副院长和化学教授。在他的实验室里，压力是由把水银压入毛细管的状况得出，在毛细管内气体保持在所要求的温度之中。他在1863年写道："在只用压力使碳酸局部液化的过程中，同时逐渐地把温度升高到88°F（30.92°C），那么液体和气体之间的分界面就变得模糊不清，失去了它的曲率而且最后消失。于是这空间就被均匀的流体占据，当压力突然下降或温度稍微降低时，这流体就显出一种特殊的状态，它的全部物质到处都是运动着的或闪烁着条纹。当温度在高于88°F时，碳酸没有明显的液化，或者没有分为两种不同的物质形态，即使压力为300或400个大气压时，也不能使其液化。"[1] 当温度为30.92°C时，液态和气态 CO_2 彼此融合，安德鲁斯把这温度称为"临界点"。每种气体都有它自己的临界温度。在这温度以下，物质可能以部分是蒸汽、部分是液体的形态存在。在这个温度以上，这个状态是不存在的，物质从气体过渡到液体而不破坏连续性，因此不可说物质何时不再为气体而开始变为液体。范德瓦尔斯从气体的数学理论的观点处理了这个问题。拉姆塞在1880年断言："临界点是这样的一点，液体由于膨胀而气体由于压缩而得到同样的比重，因此彼此相混合。"[2] 三年之后，雅明（1818—1886）得到了同样的结论。[3]

212

安德鲁斯在1869年表示了这样的意见：液化"永久气体"的失败是由于它们的临界温度比迄今所能得到的最低温度要低得多。在他的启发下，两个年轻的研究者——皮克泰特和凯特勒——以他们辉煌的演示使1877年成为科学史上难忘的一年，他

〔1〕 Miller's *Chemical Physics*, 3d ed., p.328.

〔2〕 *Nature*, Vol.22, 1880, p.46.

〔3〕 *Compt.Rend.*, Vol.96, 1883, p.1448.

们证明，“永久气体”可以被液化，而且分子的内聚力是所有物体的无例外的特性。这两位实验家使用的实验手段是由他们的工业设备提供的，一个是生产铁的设备，另一个是制造冰的设备。凯特勒是他那个时代法国最大的铁器制造商之一，他运用了由他支配的巴黎塞纳河畔夏蒂隆（at the Châtillon-sur-Seine in Paris）的巨大财富。[1] 日内瓦的拉乌尔·皮克泰特（1846—1904）对人工制造冰很感兴趣，后来他在柏林建立了一个进行低温实验的实验室。低温得到了工业上的运用，例如，三氯甲烷的纯化。在1877年12月24日于法国科学院的同一个会议上，凯特勒和皮克泰特报告了他们彼此独立地以不同方法液化了氧。一个星期以后凯勒特在法国第一流的科学家们在场的情况下于巴黎师范学校的实验室进行了一系列实验。他在当时当地液化了氢、氮和空气。皮克泰特取得了同样的成果。凯勒特的实验过程是这样的：把气体压进一个小小的管子里，使它冷却，然后撤除压力使它突然膨胀。气体的这种瞬时膨胀产生了如此低的温度，以致于大部分气体凝聚成蒸汽云。如果是氧气，应用硫酸使管子的温度降到 −29°C。压力为300个大气压。突然膨胀可能降低温度 213 200°[2]。皮克泰特使用了更加精致的仪器（花费了50,000法郎），并且得到了更大量的凝聚气体。人们按照蒸发原理得到了低温。真空泵从管中抽去了液态硫酸上的蒸汽，然后这蒸汽被液化、冷却、并被送回管子中。这样，一个全循环一直维持着。这样，液体的温度降低到约 −70°C。在这管子的内部是装有液态碳酸的另一个更细的管子。前一种液体的目的是保持后一种液体冷却。碳酸放进另一个管子中，正如上述那样由真空泵所引起的蒸发使管子温度降到 −140°C。汽态 CO_2 被硫酸冷凝。这样，CO_2 通过压缩、液化和排气进行循环，正如硫酸的循环过程一

〔1〕 *Nature*, Vol.17, 1878, pp.177, 178.

〔2〕 凯勒特的仪器的大图片见，*Nature*, Vol.17, p.267.

样。含氧的管子通过－140°的凝固的CO_2的管子的内部。氧是由加热装在上述管子的一端坚固壳中的氯酸钾产生的，那管子的另一端用塞子塞住。氧是被它自己的几百个大气压力和酷冷的联合作用而冷凝在管中。打开塞子时有小小的氧气流逸出，在氧气流的中间部分，有白色的预示为液态或固态的氧。如果液化的是氢，则逸出流是钢青色的。

氧、氮和氢这三种气体大量地被液化是奥匈帝国克拉科夫（Cracow）大学的伏罗布列夫斯基（1848—1888）和奥尔舍夫斯基以及伦敦皇家研究院的杜瓦做的。他们的仪器是以皮克泰特设计的一般原理为依据，只是发现了应用其它的液体（如乙烯或氧）更好。奥尔舍夫斯基测定了临界点、沸点、冰点和密度。他

214 们发现的几种物质的沸点如下：氧，－182.7°C；氩，－187°C；氮，－194.4°C；氢，－243.5°C；他所发现的冰点如下：氩，－189.6°C；氮，－214°C，[1] 杜瓦在1898年成功地得到了大量的液氢（有半葡萄酒杯），并且液化了氦。他在1891年宣告了液氧和液态臭氧被磁体的两极吸引。杜瓦和夫累铭已检测了低温下金属的电阻。一些纯金属（例如铂）的电阻在低温下以这样的比率下降，如果在尚未达到的更低温度下还保持这个比率，那么在绝对零度时电阻就会消失。

露的形成

热现象的研究导致对气象现象的更好的理解。有个时期人们曾认为露是从星体中落下来的，或者，无论如何它是从高空落下来的。伦敦的医生韦尔斯（1757—1817）第一个科学地研究了露的形成，其研究成果发表于1814年他的《论露》一文中。在晴朗的、寂静的夜晚、草向空中辐射出热，而没有热回到草上。草作

---

〔1〕 见表，在 *Nature*, Vol.51, 1895, pp.355, 356.

为一种不良导体，草的下部从地上接受热很少，草变冷了并且水蒸汽在它上面凝结。象金属那样的良导体从周围物体中接受热，因此这样的良导体不被露所覆盖。多云的天空由于反射回来的辐射热阻碍了露的形成。刮风是不利于生露的，因为它们将热传到正在变冷的物体上。韦尔斯假定，只有很少的凝露来自地面的蒸汽或植物的蒸发。后来，巴杰利[1]和R·罗素[2]的研究证明，韦尔斯低估了土地和植物两者的作用。实验表明，蒸汽大量的来自下面的土地，而不是来自上面的空气。这个观点正和一般人接受的观点相反。 215

人们已经得到了关于雨和雾的形成的新知识。库利厄、马斯卡尔特[3]、特别是约翰·艾特肯[4]作出结论：在雾和云的形成过程中，尘埃的存在是必不可少的。这就是说，“不管水蒸汽什么时候在大气中凝结，它总是靠某些硬核才能形成；”“空气中的尘埃粒子是水蒸汽凝结的核心”，如果没有灰尘，我们就没有雾、也没有云；没有露，而且还可能没有雨。城市里的雾正是由于灰尘的缘故。但是，说灰尘对阴云的聚结总是绝对必不可少的，那是不对的；它可能是由于盐酸、硫酸或硝酸、或者高度的过饱和气的存在所引起的。但就大气中的这些条件而言，如果没有尘埃，我们就很难有雨。艾特肯发明尘灰计数器；他在英国和瑞士作了广泛的观察。他根据在里吉（Rigi）的观察断定：“只要有一朵云形成，它就立刻开始下雨，而小雨滴落到下面干燥空气层时就蒸发了，它们落下的距离取决于它们的大小和空气的干燥度。”

---

〔1〕 *Pro.of the Royal Meteor.Soc.*, April.1891.

〔2〕 *Nature*, Vol.47, 1892, pp.210—213.

〔3〕 *Naturforscher*, 1875, p.400; *Journal de Pharmacie et de Chimie*(4), Vol.22, p.165; *Nature*, Vol.23, 1881, p.337.

〔4〕 *Nature*, Vol.23, p.196; Vol.41, p.408; Vol.44, 1891, p.279; Vol.45, p.299; Vol.49, 1893, p.544.

热力学的开始

用凝聚和稀疏分别使气体发热和变冷的实验的最早的记载之一是由法国枪炮厂的一个工人做成的，他用空气压缩法使火绒着火。这个实验的说明书被里昂的教授莫里特送到了巴黎。道尔顿仔细考查了这个题目，他曾在1800年宣读过一篇论文，“论以空气的机械压缩和稀疏产生热和冷。”[1]

216 热力学这门科学起源于企图从数学上判定蒸汽机能作出多大的功。卡诺（1796—1832）对此作了第一个推进，他在1824年发表了他的《关于火的动力的研究》（Réflexions sur la puissance motrice du feu）的论文[2]。卡诺引用了对循环操作的考虑，在这种操作过程中，一种工作物质在经过一系列变化后回到了它的初始状态。他还提出了可逆性原理，根据这个原理，热可以从冷凝器中取出并以耗费相等的功还回热源。假定永恒运动是不可能的，他断定没有一种动力机会比可逆机有更大的效率。此时，卡诺是热质说的拥护者；他相信热质守恒的学说；他比较了热的动力和下降的水的动力。他说，这两种场合都有一个最大功率，一种场合的最大功率是不依赖于水作用在其上的机械；另一种场合是不依赖于接受热的物质性质。水的动力取决于水的数量和它所落下的高度；热的动力取决于热质的数量和热源与受热器之间的温度差。但是几年以后卡诺开始相信热质说是虚妄的。他长时间未能发表的晚期著作表明，他最终相信热的动力学理论的正确性。此外，他已经掌握了能量守恒原理，“动力是自然界的一个不变量；正确地说，动力既不能创造也不能消灭。”

---

〔1〕 Rosenberger，见19页注〔2〕Ⅲ.，p.224.

〔2〕 德文再版于 *Ostwald's Klass.*，No. 37；英文本是由瑟斯顿(R.H.Thurston)翻译的，出版于1890年。

虽然克拉珀龙强调了卡诺1824年著作的重要性，但直到威廉·汤姆孙（后来叫开尔芬勋爵）提出它时它才得到普遍的承认，汤姆孙指出，需要修正卡诺的论证以便使它和热的新理论一致。1848年，汤姆孙证明，卡诺的循环变换原理导致了绝对热力学温标的概念。他在1849年发表了“由勒尼奥的实验得出的数学结果对卡诺的热动力理论的说明”。1850年2月，克劳修斯（1822—1888）送给柏林科学院一篇同样课题的论文，它包括了神一般的热力学第二定律：“热不能自动地从较冷的物体传到较热的物体。”克劳修斯此时是苏黎世的教授，后来他到了维尔茨堡，并在1869年以后到了波恩。他不是一个大实验家，而是属于很高明的数学物理学家[1]。同在1850年2月，格拉斯哥的工程力学教授兰金（1820—1872）在爱丁堡皇家学会宣读了一篇论文，在这篇论文中他声称热是分子的转动形成的，并且他独立地得到了早先被克劳修斯取得的一些结果。他没有讲到热力学第二定律，但是在他的下一篇论文中他声称能从他的论文的方程式中把它推导出来。他对第二定律的证明并没有消除人们的异义。在1851年3月，威廉·汤姆孙发表了一篇论文，它包括了被认为是严格的第二定律的证明。在他看到克劳修斯的研究之前他已获得了这个证明。由克劳修斯作出的这个定律的陈述受到了许多批评，特别是受到兰金、旺德、泰特（1831—1901）和普雷斯顿的批评。从一般的力学原理中推导它的多次努力都没有结果。汤姆孙、克劳修斯和兰金很成功地发展了热力学这门科学。早在1852年，汤姆孙就提出了能量散逸定律，稍后时期，克劳修斯也推导出来了。

---

〔1〕 在普法战争期间，他的炽热的爱国心不允许他呆在家里。他负责一个由波恩的学生组成的救护队的领导工作。见 *Proc.of Roy.Soc.of London*, Vol.48,1890,p.11.

218 能量守恒

热力学第一定律不过是能量守恒原理在热效应上的应用而已。这个原理是十九世纪物理学的最伟大的概括。它的历史从各种观点来看都是值得重视的。几个思想家几乎同时得到了这个伟大的真理；起初，他们中所有的人或者受到冷遇，或者完全被忽视。能量守恒原理是被海尔布隆（Heilbron）的医生罗伯特·迈尔建立的，并且又被哥本哈根的柯尔丁、英国的焦耳和德国的赫尔姆霍茨独立地建立。

罗伯特·迈尔（1814—1878）出生在海尔布隆。他在大学预科和神学院时期没有迹象表明他有很大的聪明才智。1832年他在蒂宾根（Tübingen）开始学医，并在1838年开始行医，但他从未对开业医生的工作感到兴趣。他旅行了很多地方，并从事生理学研究。1840年他所作的关于热带气候里病人血色的观察是他的科学著作的开始。这个观察曾导致他对决定生命现象的那些物理力进行研究。这样，他从关于有机自然界的思考中导致了在1842年作成的论文、《论无机自然界的力》。波根多夫的《年鉴》拒绝发表它。但是，李比希同意发表在他的《年鉴》的五月号上。虽然这篇论文包括了世界的能量是不变的这一伟大原理，但它并未引起人们的注意。1845年的第二篇论文完全是用他自己的经费才得以发表。以后又发表了其它一些论文。[1] 马赫叙述的如下
219 传说表明了迈尔思想的机敏[2]：“有一次在海德尔堡和迈尔仓

〔1〕 见J.J.Weyrauch, *Robert Mayer*. Stuttgart, 1890。也见Weyrauch, *Die Mechanik der Warme von Robert Mayer*, 3d ed., 1893; Weyrauch, *Kleinere Schriften und Briefe von Robert Mayer*, 1893.

〔2〕 “On the Part Played by Accident in Invention and Discovery,” *Monist*, Vol. 6, 1896, p.171.

促相遇时，约利（Jolly）略带嘲讽地说，如果迈尔的理论是正确的话，水能够被晃动而加热。迈尔没有答一句话就走了。几个星期以后，……他跑到约利那里喊道：'Es ischt so！'（正是那样！正是那样！）只有在经过很多的说明以后，约利才明白迈尔说话的意思。"迈尔的精神受到如下几方面的严重刺激：对于他的思想缺乏应有的评价，关于他的优先权的争论，以及他的两个孩子夭亡。1849年5月28日，他从二层楼窗户上跳下自杀未遂。在他大致恢复健康以后，他写了一篇关于热的机械当量的论文。1851年他被送进疯人院，在那里他受到了残忍的待遇。1853年他得到了自由，但他从未再完全恢复精神的平静。1858年。在德国只有少数几个人赞扬迈尔，而对他作出公正的历史评价最出力的一个人却是丁铎尔。丁铎尔于1862年在皇家协会上作了关于迈尔的讲演，并且还翻译了迈尔的几篇论文。威廉·汤姆孙和泰特对迈尔的研究给于较低的评价，并责备了丁铎尔低估了焦耳的工作。[1]

焦耳（1818—1889）出生在靠近曼彻斯特的索尔福德(Salford)，他是那里的一个大啤酒厂的主人。他在年轻时就从事于电磁的研究。在经过了许多困难的实验以后，他成功地证明了电解作用时吸收的热等于化合物的成份在最初结合时所放出的热。他研究了电的、化学的和机械的作用之间的联系，并导致了热的机械当量的伟大发现。他在1843年于英国协会上宣读的一篇论文中给出当量值为460千克重米。认识这个物理学家、年轻的酿酒商的朋友们劝他去申请作为苏格兰圣安德鲁斯的自然哲学教授的候选人，但是他的容貌上的轻微缺陷在一个选举人看来是个不足，因而他没有接受这个职位。他继续当一个酿酒商，但终生继续他的科学研究。1847年4月，焦耳在曼彻斯特作了一个通俗讲演，对"现在称之为能量原理的普适守恒原理第一次作了充分和明确 220

〔1〕 参阅J.Tyndall, "Notes on Scientific History", *Phil. Mag.*, July, 1864.

的阐述。”[1] 地方报纸起初没有理睬这个讲演，有一家报纸甚至拒绝报导这件事；在作了长时间争论以后，《曼彻斯特信使报》才全文发表了他的演说。1847年6月，这个论题又提呈到英国协会的牛津会议上。大会主席建议由作者〔焦耳〕作个简要的报告；不必进行讨论。“如果不是一个年轻人（他就是威廉·汤姆孙）在这个会上站起来，并以他的才智的发言引起人们对这个新理论的充分兴趣的话”，会议就要在丝毫不考虑这个新思想的情况下立即转入其他的事项。结果是，这篇论文引起了很大的轰动；焦耳吸引了科学界的注意。在会议以后，焦耳和汤姆孙又进一步地讨论了这个问题，并且汤姆孙“得到了在这之前他从未有过的观念”，而通过他，焦耳第一次听到了卡诺的理论。[2]

焦耳以约40年的时间，进行关于热的机械当量的实验。在1843年他从磁-电流得到的这个值为：一个大法国卡相当于460千克重米；他从水在管中的摩擦测得的当量值为 424.9；1845年以压缩空气测得的当量值为443.8；他在 1845 年从水的摩擦测得当量值为488.3；1847年得到的当量值为428.9；1850年得到的当量值为423.9；1878年得到的当量值为423.9[3]。

热的机械当量是自然界中如此重要的常数，以致从焦耳以来221 的一些物理学家都曾认为很需要重新测定它。最准确的测定之一是巴尔的摩的罗兰在1879年做的。[4] 这个工作的一部分是计温术问题，罗兰比焦耳对此给予更大的注意。焦耳用的是水银温度

---

〔1〕 A.W.Rücker, *Fortnightly Review*, 1894, p.652.我们大量地引用了题为《赫尔姆霍茨》(Hermann von Helmholtz)这篇文章，它再版于 *Smithsonian Report*, 1894.

〔2〕 *Nature*, Vol.49, 1893, p.164.

〔3〕 参阅 *The Scientific Papers of James Prescott Joule*, 两卷本，London, 1884; *Nature*, Vol.43, 1890, p.112.

〔4〕 *Prof.of the Am.Acad.of Arts and Sciences*, N.S., Vol.7, 1880.

计。为了方便，罗兰也用水银温度计，但是他把它跟空气温度计相比较，并且然后把他的数据归结为绝对温标。罗兰还注意到在不同温度下水的比热的变化。从不同温度的水开始，他用水在量热器中的摩擦得到了不同的机械当量值。他认为这当量值的变化是由于水的比热的改变。他发现，水的比热在30°C时达到最小值。以后，热的机械当量曾被达松伐耳、米库列斯库、格里菲斯等人测定过。后来的测定将焦耳的这个常数的估计值稍微提高了些。[1]

同在1847年，当焦耳报告他的能量观点时，赫尔姆霍茨在柏林物理学会宣读了同样课题的论文。赫尔姆霍茨（1821—1894）出生在波茨坦（Potsdam），他在柏林学过医，在那里当过慈善医院的助手，以后又在波茨坦当军医（1843—1847），在柏林当过解剖学教师，在柯尼斯堡（Königsberg）、后来又在波恩和海德尔堡当过生理学教师（1858—1871）。1871年，他接受了柏林大学物理学讲座的职务。他具有非凡渊博的知识。他是第一流的生理学家、物理学家和数学家。许多年前，克利福德在他的《看和想》的文章中讲到如下有关他的话："首先，他从研究生理学开始，解剖了眼睛和耳朵，探索它们是怎样起作用的，它们的准确构造怎样；但是他发现要研究眼睛和耳朵的作用而不同时研究光和声的本性是不行的，这就导致他研究物理学。当他开始研究物理学时，他已是这个世纪最有成就的生理学家之一，以后他又成了这个世纪最伟大的物理学家之一。以后他又发现，要研究物理学而不掌握数学是不行的，因此，他又研究了数学，于是他又成为这个世纪最有成就的数学家之一。" 222

他的题为《活力的守恒》（Die Erhaltung der Kraft）

---

[1] 参阅E.H.Griffiths, *Science Progrees*, Vol. 1, 1894. p. 127; *Johns Hopkins Circulars*, 1898, No.135.

的关于能量的著名论文[1]，是在1847年他26岁时于柏林物理学会宣读的，这篇论文起初被看成是异想天开的思辨。在1843年拒绝了迈尔的论文的波根多夫《年鉴》的编辑又拒绝了赫尔姆霍茨的论文。正如焦耳得到了威廉·汤姆孙的支持一样，赫尔姆霍茨也得到他的同学杜·博伊斯-赖蒙德和数学家雅科比为他作辩护。赫尔姆霍茨的论文在1847年用小册子的形式发表。有一个时期它很不受重视。但在1853年，它受到克劳修斯的强烈的抨击。后来这本小册子又使它的作者受到杜林等人的恶毒攻击，他们辱骂他是一个不诚实的剽窃者，是从他的先驱迈尔那里剽窃来的。[2]赫尔姆霍茨象焦耳一样，在1847年并未听说迈尔的工作，但是后来他愉快地承认了迈尔的优先权。

被迈尔和赫尔姆霍茨使用的"Kraft"（力）一词，我们应当理解为"Energy"（能量）。有一个时候在教科书中关于"力"和"能"这两个术语存在极大的混乱。这两个词经常被作为同义词使用。运用"能"这一词表示一个物质系统能够做功的量是由托马斯·杨在他的《自然哲学》讲义第八册中采用的。这223 个量被指定为mv^2，开尔芬勋爵在1849年用$\frac{1}{2}mv^2$来表示。"能量守恒"这个表述是兰金最先提出的。[3]

---

〔1〕 再版于*Ostwald's Klassiker*, No. 1. 在注释5中，赫尔姆霍茨简述了新能量原理的历史。

〔2〕 *Physical Review*, Vol. 2, 1894, p. 224.

〔3〕 研究者要更详细地知道关于热的知识，可参阅Rosenberger, Poggendorff, Heller, Mach, *Principien der Wärmelehre*, Leipzig, 1896. 此外，还可参阅Georg Helm, *Lehre von der Energie historisch-kritisch Entwickelt*, Leipzig, 1887; M. P. Desains, *Rapport sur les Progrès de la Théorie de la chaleur*, Paris, 1868; M. Berlin, *Rapport sur les progrès de la thermodynamique en France*, Paris, 1867; Joseph Paveling, *Gesch. d. Gesetze von d. Erhaltung d. Materie* und Energie, Aachen, 1891.

电 和 磁

电解的开始

电在理论上和实践上的发展是这样地快，以致于十九世纪被称之为电的世纪。

在伽伐尼发现流电和伏打制造了电堆以后，卡莱斯勒和尼科尔森用低压电流电解了水。这门技术引起了人们极大的振奋。在1800年9月西利西亚（Silesia）的李特（1776—1810）报告他成功地分别收集了两种气体以及从蓝色的硫酸盐中沉淀出铜。

在这方面的早期的工作者中有**戴维爵士**（1779—1829）。当他还是一个穷孩子时，戴维就得到"爱好化学实验"的名声。在当了布里斯托尔（Bristol）气体学院的助教以后，他于1801年当了伦敦皇家研究院的化学讲师。他的讲演得到了上流听众的喜欢。科尔里奇说："我去听戴维的演讲就增加了我的比喻的材料。"据说，如果戴维不是第一流的化学家之一，他也会是他那个时代的第一流的诗人之一。[1]

戴维证明，在水的分解中氢的体积是氧的两倍。他的最闻名的发现是用电解分解了凝固的强碱、钾碱和纯碱。在1807年钠和钾元素就这样被发现了，并且，化学的急剧进展是得到了电的帮助。 224

电解产物的明显的徙动引出了几种奇特的学说，然而在半个多世纪中站得住脚的一种学说是由**冯·格罗图斯**（1785—1822）提出的。[2]在格罗图斯的童年时期，他被禁止学习化学，但是后

---

〔1〕 *The Gallery of Portraits, With Memoirs*, London, 1883. Vol. I., p. 12.

〔2〕 即 Ch. J. D. von Grothuss. 或写成 Grotthuss.

来他在莱比锡、巴黎（在综合技术学校）和那不勒斯学过科学课程。1808年以后，他依靠自己的在普鲁士利陶恩（Lithauen）的财产过活，这就使他有空闲时间从事化学研究。在他的晚年期间，他的一些器官疾病患得很厉害，遂使他最后自杀。他是以他的论文《论水及其它物体的分解——借助于伽伐尼电池的电流进行分解》[1]出名的，该论文于1805年初版于罗马，当时他只有20岁。在由氧（记为－）和氢(记为＋)构成的一定量的水中（图17），一旦在水中形成电流，电的极性就出现了。在流径上所有的氧原子有朝向正极运动的倾向，而在同一路径上的所有氢原子都向着负极运动。因此，如果分子oh对正极线放出它的氧O，则氢h立刻被到达的另一个氧原子O’氧

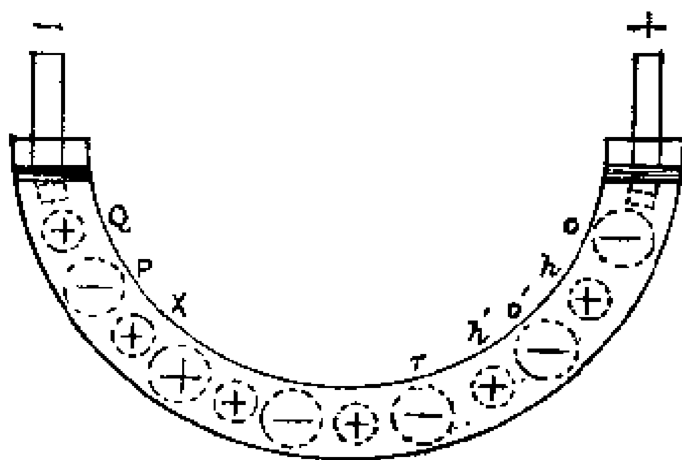


图 17

225

化，它的氢h’跟r结合，如此类推。反之，同样的作用发生于分子QP上。这样一来，有递增的交替着的原子的分离和结合。这样的分离和再结合将继续下去而没有功的消耗，这是违背能量定律的。奥斯特瓦尔德认为，静止条件下的能量不能自身成为活动的；放在地上的石头不能自己跳起而后又落下。格罗图斯假定："在氢和氧处于游离状态的时刻，其自然电或者由于它们间的接触或者由于互相摩擦而分开，因此，假定氢离子带正电，那么氧离子就是负电。”在这一点上产生了最初的不同的意见。提出修正的假

〔1〕该论文再版于1806年的*Annales de Chimie*, Vol.58, pp.54—74. 德文译本全是由奥斯特瓦尔德翻译的，*Elektrochemie*, Leipzig, 1896, pp.309—316.

说的有柏林的马格努斯、瑞典的化学家柏齐里乌斯(1779—1848)和日内瓦的德·拉·里夫(1801—1873)。至于电解导电的机制，格罗图斯的分子链被法拉第和蒙斯特(Münster)的物理学教授希托夫（1824—1914）多少作了些修正。但是，格罗图斯理论的最根本的修正是克劳修斯在1857年作出的。[1] 他论证道，按照那时所掌握的电解理论，电动势先使分子转向，因此正离子向着阴极，负离子向着阳极，然后才拉开了以前是坚固地结合成分子的离子。现在，为要分开这些离子需要有一定强度的力。因此，如果作用在离子上的电解力少于离子之间的吸引力的话，那么无论如何也不能使它们分开；如果这个力增大，那么许多分子立刻被分开。这是和事实相矛盾的。实验证明，最弱的电动势也引起分解，并且其作用比例于电流强度。为了要消除这个困难，克劳修 226 斯假定，离子不是彼此永恒地结合在一起；在液体中的部分离子处于非结合状态，它们在液体中徘徊移动寻找配偶。电流的电动势作用在这些松散的原子上。一些离子起初是自由的，最弱的电流能〔对它们发生〕作用。这样，克劳修斯为要解释电解提出了离解的观念。这个离解假说又由海德尔堡的G·昆克作了修正，修正后的假说能更好地解释离子的徙动。科尔劳施用它解释电解质导电的事实。直到1887年以前，克劳修斯的电解质成份的离解学说几乎得不到什么赞同，当时斯德哥尔摩的阿累尼乌斯根据范特霍夫（1852—1911）的溶液理论和渗透压现象以新的论据证实了它。[2]从某些新的考虑出发得到的结论是，在溶液中被溶解的物质有部分离解现象。[3]莱比锡的奥斯特瓦尔德和哥丁根的能斯特就此问题作了重要的研究。

---

〔1〕 *Poggendorff's Annales*, Vol.101, p.338.

〔2〕 S.Arrhenius, *Zeitschr.f.Physik.Chemie*, Vol.1, p.631.

〔3〕 关于渗透压和溶液论的系统的和历史的叙述，参阅 W.Ostwald, *Allgemeine Chemie*, Vol.1, 1891.巴克(Viertes Buch)或缪尔(P.Muir)的英译本是相同的。

在这些研究中，两门科学——物理学和化学的密切再结合已展现出有益的成果。在本世纪初许多科学家对这两门科学的开创性研究作过贡献；他们既是化学家又是物理学家。但是，约1835年左右，这两门科学分开了；人们只以物理学家或只以化学家闻名。约1885年，在这两门科学分开以后半个世纪，这两门学科再结合的趋势又变得很明显了，正如众所周知的以奥斯特瓦尔德、能斯特和阿累尼乌斯为首的“莱比锡学派”一样。

伏打电池

这个学派所取得的最有意义的成果之一是解决了一个争论了227 整整一个世纪的问题，也就是电动势在伏打电池里的来源或位置问题。我们还记得，伏打的接触说没有得到普遍的承认。伏打电堆动力的起源和维持是在于不同金属的接触，这一学说受到了意大利佛罗伦萨的法布隆尼（1752—1822）、英格兰的沃拉斯顿和德国李特的反对。他们认为，伏打电流的真正来源是化学作用。持这种观点的还有巴黎的贝克勒尔、日内瓦的德·拉·里夫，特别是伦敦的法拉第。法拉第在1837年和1840年发表了许多实验，这些实验似乎排除了接触说。在德国，伏打的接触说得到了最强有力的支持。其倡议者有费希纳、波根多夫、普法夫、欧姆和其它人。当能量守恒原理建立之时，如原来所教导的这个理论必须加以修正；仅仅是金属的接触不能给出无穷尽的电能。变得明显的是，在伏打电池里发生了能量的转换。尽管如此，电动势的来源仍然可能在金属的接触点上。这个问题是由能斯特在论离子的电动势作用的一篇论文中弄清楚的。[1]电动势的根源和化学现象的根源是一致的，并且正是在金属和电解质之间的接触面上。能斯特建立了如下的基本公式：

---

〔1〕 *Zeitschr.f.Physik.Chemie*, Vol.4,1889,p.129.

$$E = K \ \ln\frac{P}{p}$$

其中E是所考察的金属和电解质之间的电势差；p是金属离子在溶液中的渗透压；K是取决于所用单位的常数；P是在物理学上解释为压力的积分常数。关于伏打电池的这个学说是依据范特霍夫的渗透压的概念和阿累尼乌斯关于电解质中离解的观念。[1]能斯特作出如下的跟丹聂尔电池的作用的比较："给定一个含有液态碳酸的容器和另一个含有如氢氧化钾一类很快吸收碳酸物质的容器，并在这二个容器之间设计一个圆筒和活塞装置，以便将压力差转变为功。这个仪器一直做功到碳酸全部被吸收为止，正如丹聂尔电池在锌消耗完以前一直起着作用一样。" 228

伏打的电堆和杯冕，或是它的小小的变更，长期以来是产生流电的唯一手段。它们作功时有这样一个缺点，即由于极化作用电流很快就减少。在1830年被斯特金首次实地应用的锌的混汞法是进展的第一步。在这之前一年，A·C·贝克勒尔建造了一个能产生稍微稳定电流的电池。用两块金箔把一个玻璃电槽分成三部分。两个金箔的中间部分装上盐，两边盛上备用溶液，分别浸入铜板和锌板。用这样的一个电池，一个切线电流计的偏转在半小时内从84度降到68度。丹聂尔（1790—1845）的努力促使在发明一个恒定电池方面取得更大成功。他是伦敦国王学院的化学教授。他对于科学的贡献不仅有"丹聂尔电池"，而且还有"丹聂尔湿度计"。在1836年这个电池的发明是由于他和法拉第关系亲近的缘故。在一封叙述电池的信中，他给法拉第写了如下的话："你

[1] 对于这个学说的评注，见W.Ostwald, *Elektrochemie*, 1896, pp.1133—1148; W.Ostwald, *Allg.Chemie*, Vol. 2, 1., 1893; W.Nernst, *Theoretical Chemistry*, trans.by C.S.Palmer, 1895, pp.609—616; A.Wüllner, *Experimentalphysik*, Vol. 3, 1897, pp.909—919.

知道我对你的《关于电的实验研究》有多么浓厚的兴趣，我多么
229 热切地利用你厚意给我的许多机会，对我在学习你最近的一系列论文中出现的许多困难，我运用了你所作的口头解释。”[1]在他的原始的电池里，浓硫酸铜和稀硫酸彼此被动物膜——公牛的气管——隔开。不久以后，加西奥特（1797—1877）提议用多孔的陶土杯代替公牛的气管。1839年格罗夫爵士（1811—1896）交给英国协会一篇题为《论具有非常能量的小伏打电池》的论文，并展出了一个“快速造成”的电池组。1840年格罗夫被任命为伦敦学院实验哲学教授。后来他又从事法律事务[2]，但仍对科学感兴趣。还有另一种电池组，[3]在这种电池里以阴电极的粗糙面机械地阻止极化，这种电池是由伦敦的外科医生斯米（1818—1877）[4]设计的。在格罗夫的电池里，铂的昂贵费用是个缺陷；因此，本生和其他人建议用碳代替金属铂。“本生电池”的图说发表于1841年[5]。巴黎的化学家勒克朗谢（1839—1882）在1867年做成的电池是许多暂流电池组中的一种。比丹聂尔电池的电动势更稳定的电池是在1873年由拉蒂默·克拉克设计的，这种电池

〔1〕 *Phil.Trans.*, Part Ⅰ.,1836,p.107.

〔2〕 *Electrician* (London), Vol.37,1896,p.483; *Nature*, Vol.54, 1896,p.393.

〔3〕 *Phil.Mag.*(3), Vol.16.1840.

〔4〕 读者可能对下面的妙语感兴趣，这是麦克斯韦写的关于电的抒情诗中的一段：

“象丹聂尔电池一样稳定，象格罗夫电池一样强劲，
所有这些电池的深处全都象斯米电池一样热情沸腾；
在我的心中爱情如春潮汹涌，
所有的电路都已与您接通。”

这四句诗引自 L.Campbell and W.Garnett, *Life of J.C. Maxwell*,1882,p.630.

〔5〕 *Poggendorff's Annalen*, Vol.54,1841,p.417.

的变形曾被瑞利勋爵、赫尔姆霍茨和卡哈特使用过。克拉克电池曾被当作国际电动势的标准，并且颁发了关于它的制备方法的官方说明书。

蓄电池组

230

1803年李特描述了第一个蓄电池组或蓄电池。他发现，当把两根铂丝放进水中，并让电池组的电流通过它们时，在一根铂丝上出现了氢，而在另一根铂丝上出现了氧，然后，如果把这两根铂丝和电池组分开并用导体使它们彼此连接，那么，这两根铂丝的作用就象电池组的极一样，而且在短暂的瞬间这新电路上有电流通过。它的方向和原电流相反。格罗夫在1843年研究了这个课题，他制造了一个气体电池组以说明“极化”现象。1859年，A. C. 贝克勒克的学生加斯通·普朗忒（1834—1889）对于这种储存能量的方式作了透彻的研究，并设计了一种蓄电池，它是由两块卷起的薄铅极并把它们浸在稀硫酸中组成的。必须设法送出电流通过电池并数次倒转电流方向使铅极“成形”（在阳极上镀上半渗透的二氧化铅薄膜，在阴极上镀上多孔的金属面）。他的电池比任何原电池组有更高的电动势，但由于冗长的“成形”过程，它很难成为商业成品。它一直没有受到人们的重视。1881年福尔[1]回避了这个“成形”工序。他把红铅镀在铅极板上完成了这个改革。因此，电池的容量也增加了。在作了这个改进以后，商业界立刻变得对它感兴趣了。在1881年从巴黎寄到伦敦的四个电池，其重量只有75磅，可是据说它们荷载了1,000,000呎-磅的能量！然而，这电池也没有比几哂煤所储存的能量更多。发明者充满着希望，以非常的努力去制造有商业用途的蓄电池组，或“蓄电池”。在最近几年里，蓄电池组在汽车和无线电设

〔1〕 1840年出生，1898年去世。

备上得到了最广泛的应用。

231 奥斯特的实验和电磁学的开始

电磁学起源于1819年闻名的"奥斯特实验"。奥斯特(1777—1851)出生在兰格兰(Langeland)的鲁克耶宾(Rudkjöbing),在哥本哈根大学听过课,后来是这个大学和这里的综合技术学校的教授。汉斯滕在1857年就奥斯特的伟大发现给法拉第写信讲道:[1]"在上一世纪就已有一种普遍的想法,认为电力和磁力之间具有很大的相似性并且或许是同一性;问题只在于如何用实验来证明它。奥斯特试着把他的伽伐尼电池的导线垂直地(成直角地)放在磁针的上方,但是没有显示可觉察的运动。有一次在他的讲演结束以后,当时他已用强伽伐尼电池做了其它实验,他说:'现在,当电池还是很强的时候,让我们试作一次导线和磁针平行放置的实验。'当他按照这个方式作的时候,他为看到磁针发生大的振动(几乎是和磁子午线成直角)感到十分迷惑和震惊。那时他说:'让我们现在掉转电流的方向',而磁针偏向相反的方向。这样,就作出了伟大的发现,并且据说'他偶然地使磁针转过来',这也不是没有道理的。与提出力应该是横向的任何其他人相比,他没有更深刻的思想。但是,好象拉格朗日讲过牛顿的类似的机遇:'这样的偶然性仅仅被那些理应得到它们的人所碰上。'"

"奥斯特教授是一个有天才的人,但他是一个非常不幸的实验家;他不会操作仪器。他总是需要一个助手,或者他的一个有一双巧手的听众,以便安排实验;我作为他的听众时常在这方面

[1] B.Jones, *Life and Letters of Faraday*, London, 1870, Vol.Ⅱ.,p.390.

协助他。”[1]

奥斯特在磁针和带电导线之间放上各种不同的介质，并且得 232 出结论：电流“通过玻璃、金属、木头、水、树脂、陶器、石头作用在磁针上；因为当我们在磁针和导线二者之间放上玻璃板、或金属板、或木板时，其作用并未被取消；而且这三种板合起来的确也很难减小其作用。”

到处都在重复奥斯特的实验。著名的巴黎天文学家和物理学家**阿拉哥**（1786—1853）在第二年（1820年）观察到铁屑被电流吸引。他得出结论，即使导线不是铁的，载流导线必须认为是磁体。1822年戴维认为，对铁屑的这种明显的吸引确实是由于铁屑要在导线周围形成圆形的排列；铁屑的相反的极彼此吸引，并且形成了围绕导线的链环。磁化力作用在和导线成直角的平面上这一事实，使安培把导线拧成螺旋形，以便强化对放在它内部的磁针的作用。**安培**（1775—1836）[2] 出生在里昂，少年时就显出了他的数学才能。在革命时期，他的父亲被斩首。因此，年轻的安培精神上受到了巨大的打击，当他凝视着天空，或者机械地把沙土

---

〔1〕 奥斯特的论文见 Gilbert's *Ann.*, Vol. 66, 1820, p.295; Ostwald, *Electrochemie*, 1896, p.367; Ostwald's *Klassiker*, No.63; 巴纳德就这个发现说：“当奥斯特在 1819 年观察到磁针受邻近磁流*的影响而扰动时，哪些自称已在微不足道的迹象中理解了科学所具有的伟大真理的人，显得多么荒唐无稽？这些人竟说，当时科学的权威已超过了插翅膀的天使，它的飞快的速度使奥伯伦(Oberon)身边的小妖相形见绌，并且对那‘在40分钟内绕地球赤道一周’的速度已觉得是太缓慢和不能令人满意了。”

* 原文为“magnetic current”（磁流），疑为误，应为“电流”。——译者注。

〔2〕 参阅 Arago, “Eulogy on Ampère”, *Smithsonian Report*, 1872, p.111.

堆成小堆的时候，时光就一个钟头一个钟头地静静地流逝了。一年以后，他从他的精神恍惚中醒悟过来，而他对科学的热爱是由于他读了卢梭（Rousseau）关于植物学的著作而重新点燃起来的。他于1799年结婚以后，他的宗教感情变得非常强烈。他的虔诚的天主教信仰，虽然在他的中年时期减弱了些，但到了他的晚233 年又表现得很强烈。他成为里昂的物理学和化学教授。在他的妻子去世以后，感到消沉和忧郁的安培希望离开里昂。出了名的安培被荣誉——伟大的安培！——所压倒，离开了他的脑力劳动，他又一次变得犹豫、胆惊、忧虑和苦恼，并且相信旁人胜过相信他自己。[1]1805年他和巴黎的综合技术学校发生了关系，他在这里从事重要的研究达二十年之久。[2]

当奥斯特仅仅发现电流对磁体的作用时，安培发现了一个电流对另一个电流的作用：相同方向的平行电流彼此相吸；相反方

---

〔1〕 *The Story of his Love, being the journal and early correspondence of André Marie Ampère*, edited by Madame H.C., London, 1873, p.164.

〔2〕 下面的一段文字摘自1805年的一封信，它描写了他活生生的情景："我的生活是一个圆环，没有什么东西能打破它的单调。……我只有一种娱乐，一种非常空洞非常娇揉做作的娱乐，而且我也很少欣赏这种娱乐，那就是和在巴黎从事于〔形而上学〕这门科学的人讨论形而上学问题。他们比那些数学家对我和善。然而我的职务迫使我在数学上取乐，数学的环境是无助于我的消遣的，因此，我不再对数学有多少兴趣。不过，自从我到这里以来，我已写了两篇《论计算》的论文，它们都刊登在综合技术学校的杂志上。除了星期天以外，我很少能够看见象德比朗（M.Maine de Biran）和特拉西（M.de Tracy）这样的形而上学家，前者跟我很亲密，我和后者偶尔在奥泰尔（Auteuil）用膳，他住在那里。它几乎是使我想起索恩（Saône）河畔的巴黎的唯一的乡村。"同上，p.322.

向的平行电流彼此相斥。[1]一些批评家在这些美丽的现象中看不见比旧的电吸引和电排斥有什么更多的东西。对此，安培回答说，虽然相同的电荷彼此排斥，然而载有平行电流的导体却彼此吸引。另一个批评家为了贬低这个发现，断言：既然已知两个电流都作用在同一个磁体上，因此，很明显，它们会彼此作用。听到这些话时，阿拉哥就从他的口袋里掏出两把钥匙，并回答说："这两把钥匙的每一把都吸引磁体，因此，你认为它们也彼此吸引吗？"

安培作出了一个关于电流使磁体偏斜的方向法则——"安培法则"。法拉第得到了更广泛的〔关于电和磁〕关系的观念，并设计了许多实验以证明电流和磁倾向于彼此环绕。安培又推广了这个结论。塞贝克把电流看成是磁的作用。跟塞贝克的意见相反，安培认为，磁在本原上是由于电流的作用。在磁体中的每个粒子都有一种产生磁极的赤道圈式的电流。磁化一个磁体是促使所有这些假想的分子电流在同一方向上流动。按照安培的说法，地磁是来源于绕着地球的电流。1823年安培发表了一篇论文，给出了关于这个新现象的数学理论。麦克斯韦对这项研究的评价是"形式完美和准确无误。" 234

欧姆定律

欧姆（1789—1854）[2]是一个天才的研究者，虽然他没能跟他那时代的伟大物理学家有个人接触，从而受到影响，但他独立地和孤独地工作着，并且发现了以他的名字命名的伟大定律。他出生在埃尔兰根（Erlangen），在他出生地的大学听过课，然

---

〔1〕 *Annales de Chemie et de Physique*, Vol.15, 1820.

〔2〕 参阅 Eugene Lommel, "The Scientific Work of Georg Simon Ohm", *Smithsonian Report*, 1891, pp.247—256.

后在哥特斯塔特(Gottstadt)、诺伊弗夏特尔(Neufchâtel)和斑贝格(Bamberg)中学任教。在他30岁时，他当了科隆(Cologne)大学预科的数学和物理学教师。他很成功地在这学校教了九年书。他那时候的一个学生迪里希莱特后来成为大名鼎鼎的数学家。欧姆对于从事研究工作很有雄心抱负，但是由于缺

235 少时间和书本，以及缺少适当的仪器，给研究工作的进展带来了困难。当他是一个孩子时，他通过他的父亲(一个锁匠)学到了机械技能，这就使他有能力为自己制造许多仪器。他的第一个实验是关于金属的相对传导率[1]。他用同样粗细的不同材料的导线，发现在下述长度下具有相同的传导率：铜为1000，金为574，银为356，锌为333，黄铜为280，铁为174，铂为171，锡为168，铅为97。从他的测量看来，银比起铜来是差得多的导体，虽然银实际上是更好的导体。后来，欧姆实图验证他的结果，并且发现了错误。第一次使用的银导线在拉制时覆盖了油层，结果，表面看来，两根导线粗细相同，其实先拉成的那一根要细得多。用同样材料但不同粗细的各种导线进一步实验，使他得到的结果是，如果它们的长度和它们的横截面成正比，则它们的传导率相同。在这些实验中，他的电池组[电流]的变化["力的波动"]给他带来了很大的麻烦。最后，在波根多夫的建议下，他采用温差电池作为电源。这才摆脱了那些麻烦。

在欧姆用以建立他的定律的那些实验中，他用了两个锡容器A和B，如图18。在容器A中盛了沸水；在容器B里盛了雪或

236 冰。他还备制了一根铋棒abb′a′；并用铜螺丝条把它固定，它的两个自由端被放进盛有水银的两个杯中。因此，温差电偶是由铋

[1] G.S.Ohm, "Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contaktelectricität leiten, etc.," in *Schweigger's Journal f.Chemie u.Physik*, Vol.46, 1826, p.144. 在本文中包括了欧姆定律的实验证明。

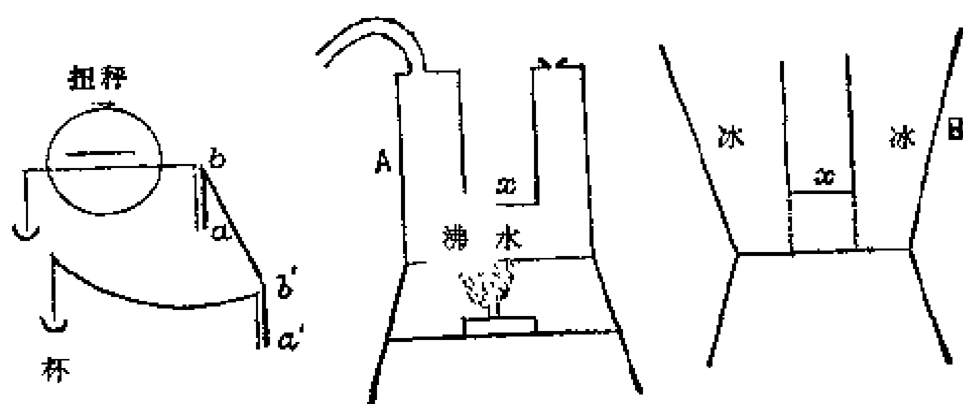


图 18

和铜组成的。为要产生电流，把接合端ab放进容A的中空圆筒 x 中，而把接合端a′b′放进容器B的相应位置上。每当两个水银杯同导体彼此连接形成回路时，温度差就产生了电流。在欧姆的指导下，有个机匠为欧姆制造了一个扭力天平。磁针用5吋长的平导线吊在扭力端上。当磁针受电流作用而偏离它在磁子午线上的静止位置时，它将受到扭力作用而回到它原来的位置上。扭力端所要偏转的整个角度是以圆周的百分度来测量的。使磁针偏离它初始位置的力和这个角度成正比。因此，电流强度可以参看每一次所测量到的、为使磁针回到零位扭力端所转的角度。

欧姆配制了相同粗细（7/96吋）的八种铜导线，其长度分别为2、4，6，10，18，34，66，130吋。把它们一个接一个地插进线路中，测出每一次线路中的电流强度。在1826年1月8日，他得到了如下的数据：

导体序号	1	2	3	4	5	6	7	8
扭转角的百分度	$326\frac{3}{4}$	$300\frac{3}{4}$	$277\frac{3}{4}$	$238\frac{1}{4}$	$190\frac{3}{4}$	$134\frac{1}{4}$	$83\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{2}$

在该月的11日和15日这二天，他每天取两组以上读数。他把这些读数制成表，然后说：“以上数据能够十分令人满意地以等式

$$X=\frac{a}{b+x}$$

237 描述，式中X是长度为x的导体的磁效应强度，a和b是依赖于激发力和电路其余部分的电阻的常数。”他给出b的值为$20\frac{1}{4}$，并且对于以上给定的一组测量值，量a的值为7285。由这些数值给出的结果和所有以上给出的角度数非常近似。例如，取第三号导体，对于它$x=6$，然后通过计算，X值为277.53，而它的测量值为$277\frac{3}{4}$。这些实验依照所选取的黄铜线的电阻而变化，而且还依照温差电偶所取的两个温度〔即溶化冰的温度和室温(7.5℃)〕而变化。根据温度范围内的这个变化，欧姆得到了产生不同a值但不影响b的电动势的变化量。总之，上述公式是令人满意的。这样一来，新的定律建立了，因为a表示电动势，$b+x$表示电路的总电阻，而X表示电流强度。而后，欧姆用实验方法建立了当电池是在串联电弧以及并联电弧情况下的电流强度的公式。这些结果都发表在1826年。欧姆因为引入和定义电动势、电流强度和电阻的精确概念理应得到伟大的荣誉。

第二年欧姆出版了一本书，书名是《电路，数学研究》（柏林，1827年）。它包括欧姆定律的理论推导，它比他的1826年作出实验推导的论文闻名得多。事实上，他的实验论文很少人知道，以至于长期来流传着并且仍然存在着这样的印象，即他的定律的根据是理论、而他从未用经验方法证实这个定律。这个误解或许说明了欧姆的结论难以接受。柏林的多弗教授(1803—1879)说：“在柏林《科学评论年鉴》看来，欧姆的理论被称之为纯属
238 空洞的编造，永远不能发现一点点那怕是最肤浅的事实观测支持的样子；有的人甚至写道，‘谁要是以崇敬的目光看待这个世界，则他必须摒弃作为一种痴心妄想的结果的这本书，它的唯一的成就是损害自然界的尊严。’”〔1〕

欧姆的远大抱负是要得到大学教授的职称，我们可以很容易地想象到，对他的这种不公正的评价会给他怎样的影响。为了写

〔1〕 *Memorial of Joseph Henry*, 1880. p. 489.

他的1827年的那本书，他请了假而来到柏林，在那里，图书馆的条件要比科隆好得多。由于出版这本书，他不仅没有得到提升，反而招惹了某学校官员（他是黑格尔主义的支持者，因此反对实验研究）的恶感，结果，他只好辞去科隆的职务。

欧姆在柏林住了六年，在军事学校每星期上三级数学课，年薪为300塔勒。1833年他在尼恩贝格（Nürnberg）综合技术学校得到了一个职位。他的电学研究逐渐地受到尊敬和赞赏。波根多夫和费希纳在德国、楞茨在俄国、惠斯通在英国、亨利在美国都表示了他们对他的工作的钦佩。伦敦皇家学会在1841年授与他科普利奖章。1849年，当他62岁时，他年轻时的抱负终于实现了。他被任命为慕尼黑大学的非常任教授，并在1852年当上了正式教授。两年后他就去世了。

电阻的测量

十分敬慕欧姆的惠斯通了解到更准确地测量电阻的手段的必要性，发明了闻名的“惠斯通电桥”。惠斯通（1802—1875）出生在格洛西斯特（Gloucester）附近。他是一个乐器制造师，但在1834年他接受了伦敦国王学院的实验物理学讲座之职。后来他退职了，过着隐居生活，依靠他的发明，特别是发明电报机的收入过日子。他是一个有非凡技巧的实验家，然而他厌恶在公众场合讲话。“在国王学院履行他的公职时，他讲授了八课声学，……可是，他经常而又过份地怀疑自己的说话能力，这成了他一个难于克服的障碍，不久以后他就停止了他的讲课，但还保留了许多年的教授职称。虽然在私人交谈中，任何一个人都会被他的有才能的和清晰的谈话所吸引，但在公众场合，他试图重复同样的过程，结果总是令人不满意的。”[1]由于这个缘故，他的一些较重

239

[1] *Proc.Roy.Soc.of London*, Vol.24, p.XVIII.

要的研究都是由法拉第在皇家学院的讲堂上代为宣读。[1]

指出这一点是有意义的，即电阻的测量主要是由那些对发展电报有兴趣的那些人使之完善的。惠斯通发明了变阻器，但是它又被西门子首先使用的电阻箱所代替。测量电阻的较早的方法由于依赖于所用电池组的稳定性而显得十分麻烦。这种困难的原因为贝克勒尔和惠斯通所排除，前者采用了差绕电流计，后来采用了克里斯蒂建议的方法，并导致了“惠斯通电桥”的发明。1843年惠斯通描述了两种形式的电桥，它们只是在线路的排列方面不同而已。

电流计的发展

电流计是哈莱（Halle）地方的教授**施魏格**（1779—1857）于1820年在奥斯特的实验闻名以后不久就立即发明了。施魏格以导线多次绕过磁针而增加了电流的有效作用。1825年，佛罗伦萨的诺比利（1784—1835）用了无定向倍加器，它有两个彼此牢固接合的指针，一个指针的南极和另一个指针的北极指向相向。巴黎的教授普莱（1790—1868）在1839年发明了正切和正弦电流计。威廉·汤姆孙爵士在电流计的灵敏度方面作了重大的改进，他设计了为通过海底电缆的信号用的镜象电流计。达松伐耳设计的电流计受到极大的赞赏。在原理上它和用于海底电报的威廉·汤姆孙爵士的“虹吸记录器”相同，也如同早在1836年斯特金使用过的悬圈电流计一样。大约在1890年，为了在灵敏实验中悬吊指针，波伊斯推荐使用石英丝来代替蚕丝。

240

[1] *Phil. Trans.*, Vol.133, PP.303—327; *Scientific Papers of Sir Charles Wheatstone*, London, 1879, p.127.

法拉第的工作

法拉第（1791—1867）是十九世纪电磁领域中最伟大的实验家，他出生在伦敦的纽因顿（Newington），是一个铁匠的儿子。他说："我所受的教育是最平常的，比在普通的日校中基本的读、写、算多不了多少，我课外的时间都消耗在家里和街道上。"[1]1804年，他在靠近他家的书店和装订厂当童工。第二年他成为装订学徒工。这时期他喜爱阅读偶然经过他手的科学书籍。他说："我做了一些这样简单的化学实验，以便花在这上面的费用是每周几个便士，并且还造了一架电机。"在他十九岁时，他有时在晚上去听塔特姆先生关于自然哲学的讲演，他的哥哥为他支付入场费用。1812年，他幸运地听到了伟大的化学家戴维在皇家研究院的四次讲演。约在此时，法拉第到伦敦的一个法国人开的工厂里，当上了正式的装订工。他的这新的工作是不符合他心愿的。后来他说："我渴望离开商业工作，我认为这是不道德的和自私的，我希望进入科学部门工作，我想象在科学部门里科学研究者都是和蔼可亲和心胸宽广的人，这个想法促使我最后迈出了大胆和天真的一步，给戴维写了一封信，表示我的愿望，并希望他那里如果有机会时他会支持我的意愿，同时，我把记录他讲演的笔记寄给了他。"戴维复信说："来信证明你把你的心事告诉了我，我绝没有因此而感到不快……。"1831年，法拉第在皇家研究院当上了戴维的助手。在那年秋天，戴维和他的妻子出发到外国去旅行，法拉第作为他们的秘书也跟随前往。随同戴维游历了法国、意大利、瑞士以后，他在1815年回到了皇家研究院。在他回国后不久，他就开始了独创性的研究，并在1816年发表了他的第一篇论文。他也开始在"市哲学学会"作讲演。他在一封

〔1〕 R.Jones, *Life and Letters of Faraday*, 1870, Vol.1.,p.9.

信中写道：“我欣赏我有荣幸的机会与戴维爵士在一起，得以促进化学和科学的知识。”1821年法拉第结了婚，并带着他的妻子到他在皇家研究院的住房，他们一起在这里生活了四十六年。1824年他被选为皇家学会的会员，此时戴维是皇家学会的主席。遗憾的是，妒忌使戴维反对法拉第的当选。然而，法拉第总是怀着敬慕的心情称颂戴维的天才，讲到在他自己早期的科学生涯中戴维对他做了许多启导他的工作。1825年，法拉第任皇家研究院的院长。

242

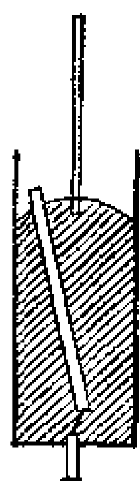


图19 驱动在水银中的磁体。它的底端被一根线系住，它的上端绕着载流导线转动。

在英国，沃拉斯顿研究过奥斯特1820年的重要实验，他于1821年在皇家研究院实验室在戴维参加下试图以实验将电流引起磁针的偏转变成为磁针的持久转动。他还希望得到绕着磁体转动的电流的反效应。他的实验失败了。正如前面讲到的一样，法拉第开始研究磁的转动，在1821年圣诞节那天早晨，他第一次给他的妻子表演了磁针围绕电流的转动。[1]（见图19）法拉第因为在他描述实验的论文中没有提到沃拉斯顿而受到责备，然而法拉第正当地认为，他一点也没有从沃拉斯顿那里得到什么帮助。[2]

他的另一些研究是关于气体的液化、关于振动表面和化学上的问题。在1831年他发现了由磁生电和感应电流。早在1824年他就论证过，既然伏打电流对磁体有作用，那么磁体也应当对电流有反作用。但是当时他尚未得到这种效应的实验证据。再则，他已

〔1〕 John Tyndall, *Faraday as a Discoverer*, New York, 1877, p.12. 也见 *Michael Faraday* by S.P.Thompson (1851—1916).

〔2〕 法拉第在他的“Historical Statement respecting Electro-magnetic Rotation”，作了全部解释，*Experimental Researches*, Vol. II., pp.159—162.

知带电体会对不带电体起作用，知道一根载有电流的导线是带电体了。这根带电导线能够在别的导线中激起类似于它自己的状态吗？1825年他将一根导线通以电流，这根导线紧挨着另一根与电流计相接的导线的近旁，但是没有得到结果。感应现象的短瞬间的存在那时没有被他注意到。1828年他又做了一次没有结果的实验。〔1〕

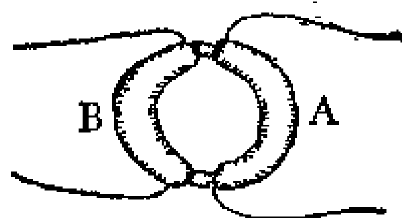


图 20

但是法拉第坚持着实验。1831年8月，他取了一个软铁环并以线圈A和B缠绕着它（图20）。线圈B跟一个电流计相连接。当线圈A和有10个电池的电池组相接时，电流计的指针振荡起来，并且最后又停在原来的位置上。在切断电源时指针又受到扰动。法拉第没有立即领会这种现象的全部意义。他在9月23日的一封信中写道："我现在又忙于电磁的研究，并且认为抓到了一点好东西，但是还不能说明白。它可能是杂草而不是鱼，竭尽全力，我终究可以把它拉起来。"第二天他取了一个铁圆筒，以跟电流计相连接的螺旋线把它绕起来。然后把圆筒放在条形磁铁的两极之间，如图21所示。"每当与磁体的N、S相接或断开时，在图示的螺旋线（电流计）上都有磁的运动——正如以前的一些情况一样，作用不是持久的，而纯属瞬时的推或拉……因此，磁变换为电在这里就很清楚了。"这个实验和奥斯特的实验相反，电流是被磁激起的。

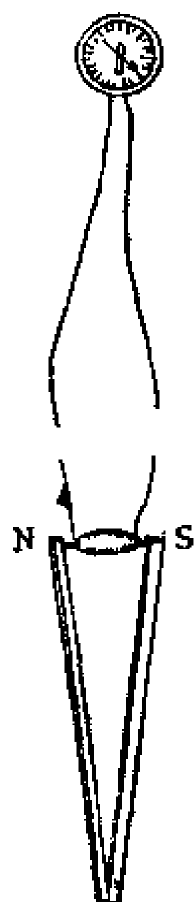


图 21

1831年10月1日，法拉第发现了感生电流。把一根具有203呎长的绝缘铜线绕成的螺旋线和一个电流计相接，把另一个同样长并绕在同一块木头上

〔1〕 B.Jones，同上，Vol.Ⅱ.，p.2，以下的叙述引自该史料。

的线圈跟有10个电池的电池组的两极相接。“当电流接通或断开时看到〔电流计〕的急速跳动，但是这跳动是如此微弱，以致于很难觉察。当接通电流时指针以一种方式跳动，当断开时就以另一种方式跳动，并在中间时刻指针又回到它的自然位置上。”在10月17日，他只是把永磁铁插进导线圈中就产生了同样的效应。在这些实验里，没有预料到的现象是，感生效应不是连续的；它是瞬时的，“并且更象具有普通莱顿瓶的电震所产生的电波的性质，而不象是来自伏打电池的电流。”〔1〕

这些划时代的成果弄清了阿拉哥的神秘的实验，他在1824年观察到一个磁体由于在它附近转动一个铜圆盘而引起运动。

有一个时候，法拉第放下了电磁的研究，而从事于研究电解和伏打电池。他发现了电解定律。不管电压、电极面积、液体的导电性如何，被电解的水量正比于通过液体的电量。这样一来，释放出来的气体的数量是所通过的电量的精确量度。接着他确定了相等的电量分解了不同的电解质相当的量。1834年，他引入了“阳极”和“阴极”的术语。

1834年詹金观察到，如果绕着电磁体的导线连接了单个电池的两极，如果某个人每只手抓住导线一端，那么每当断开电路时就感觉到电震。巴黎的梅森也观察到类似现象。在不知道亨利关于自感现象的研究的情况下，法拉第在1834年开始研究这种作用，并且他认识到它是一种“电流对它自身的感应”；他成功地证明“额外电流”的存在。这“额外电流”在“断路”时和原电路同方向并加强原电流；当“接通”电路时它向相反方向流出并

---

〔1〕 法拉第在 *Experimental Researches in Electricity*(London, 1839, Vol. I.)* 中记述了他的实验。也见 *Ostwald's Klassiker*, No.81. 法拉第在书中叙述的实验顺序并不完全是法拉第的发现顺序。

* 该书有中译本：周昌寿译：《法拉第电学实验研究》。商务印书馆1933年版——译者者。

减弱了原电流。存在这种“额外电流”的理论起初受到相当强烈的反对，但最后被其他的研究者所证实。

洛奇爵士回忆说，法拉第的第一个电磁装置、发电机的先驱，产生了如此“无关紧要”的结果，以致法拉第在作了关于它的讲演以后，还有人问他究竟有什么用。教堂的贵人们已经形成了它在纵火犯的手中有可能带来危险的观念，并且为这个发现感到遗憾。知识走在理解的前面。一个丹麦的思想家说得好：“我们生活在前，但我们理解在后。”后来丁铎尔想到法拉第关于电磁的实验，写下了如下热情的话：“我不能不认为……关于磁-电的这个发现是迄今所获得的最伟大的实验成果。这是法拉第成就的勃朗山峰（Mont Blanc）。他总是在高水平上工作，但是他从未到达比这更高的高峰。”[1]

245

被勇敢的英国探险家攀登上的这个巍峨的高峰，一位美国探险家也在同时到达了，在抵达山巅之前，这两个探险家彼此都不知道另一个所作的努力。在磁电的发现方面，法拉第的名字必须和亨利的名字连在一起。

亨利的研究

约瑟夫·亨利（1799—1878）出生在纽约的奥尔巴尼（Albany）。在他15岁时他就进入钟表修理店当学徒，虽然他那时的主要抱负是要作一个演员和剧作家。他偶然地碰见了格雷戈

〔1〕“在我们的物理学研究中有这样一种状态，这就是经常看不到与研究者的数量相比是很少的一部分成功的发现。确实，不成功的尝试、甚至对那些作出了伟大发现的幸运的人们所作的不成功的尝试也要比他们成功的尝试在数量上大得多。这使人想起法拉第的名言：有千分之一的报偿也就心满意足。”P.W. Bridgmann, *The Logic of Modern Physics*, New York, 1927, p.209.

里的《实验哲学讲义》，精读这本著作使他产生了对科学的热爱。他进了奥尔巴尼学院当学生，并在1826年成了这里的数学教授。在1832年他受聘为普林斯顿学院的自然哲学教授，并在1846年作了新成立的华盛顿斯密森学院的院长。他于1827年在奥尔巴尼开始了创造性的研究。他那时的教授和院长两个职位使他把大量的时间花费在教学和日常工作上，只剩下很少时间进行研究。在奥尔巴尼学院除了假期——8月——以外，每天7小时的教学以及缺少试验用房几乎妨碍了所有的研究。他的研究是在学院的大厅里进行的，并在九月一日学校重新开学时一定要停下来。[1] 在美国，自从富兰克林以后亨利是第一个从事重要的创造性的电学实验的。

246

亨利作出的第一个进展是在电磁方面。在这里，我们要预先叙述的是，1820年阿拉哥和安培以载电流螺管使放在其中的钢针磁化，而1825年斯特金描述了最早的名副其实的电磁铁。斯特金（1783—1850）是兰开夏（Lancashire）地方的一个闲散的鞋匠的儿子，是一个自学的科学家，是《电学杂志》月刊的创刊人。[2]斯特金于1825年所作的电磁铁能提起9磅的重物，约为它本身的重量的20倍。他用软铁代替钢，并把铁弯成马蹄形，在铁上涂以清漆，以便使它和单层裸铜导线绝缘，这条铜导线绕着软铁稀疏地绕了18螺圈。电流是来自于内电阻很小的铜锌电池。一旦接通电流时，这块马蹄形铁就成为强磁体，当电流停止时它就立即失去了它的吸引力，这一事实使它成为一个人们普遍感兴趣的课题。乌得勒支的莫尔教授造了一块能吊起154磅重物的马蹄形磁体。但是，作出重大改进的一个人是奥尔巴尼的亨利。他

---

〔1〕 Mary A. Henry, "A Study of the Work of Faraday and Henry," *Electrical Engineer*, Vol. 13. p. 28.

〔2〕 关于他的履历，参阅 S. P. Tompson, *The Electromagnet*, New York, 1891, pp. 412—418.

以包上丝绸的绝缘铜导线代替在铁上涂清漆；他以缠上许多圈的 247 导线代替铁心周围的几圈导线。1829年3月，展出了他的一块绕有400圈导线的磁铁。进一步的改进是用两端自由的线圈缠绕铁心几圈。由于线圈是并联地排列的，因此电池的电流可以分成几份。他用适当大小的线圈和不同类型的电池组作了实验，得到了极为重要的结论，即人们可以用一根单根导线从几个电池串联成的"强"电池组中得到电流的"强"磁体；或者另一种是以许多短导线由一个具有一对大板极的"定量"电池激发电流的"定量"磁体。前一种电磁铁当电流从电池到磁铁要通过相当长的距离时被选用，例如在电报机中。亨利的电磁体在具有和手的宽度差不多的电极板的单一电池的激发下，能提起50倍于自己重量的物体。[1]

当我们想到亨利在这时候并不知道欧姆在1826年所发现的定律时，这些成果的独创性就更为突出了。1833年亨利问贝奇博士："你能给我一点关于欧姆理论的资料吗？在哪里找得到它呢？"直到1837年他访问伦敦期间，他才熟悉了欧姆的理论。[2]

1829年8月，当他正在实验具有不同长度导线的磁铁的提举力、并用他的"强"磁铁和电池作成了构成现今电报机的实际组合时，他看到了通有电流的长线圈在断路时所产生的意料之外的电火花。"自然……在一瞬间撩开了她的面纱，引诱他向另一个 248 方向，待到1830年8月又一个假期来到的时候，他就对这个新的现象进行了研究。"他认识了它的性质，并于1832年发表了关于这个问题的文章，题为《在长螺旋线中的电自感》[3]。法拉第

[1] 亨利的成果发表在 *Am.Jour.of Sci.*, Vol.19, January, 1831, pp.404, 405. 还参阅 "Scientific Writings of Joseph Henry", 在 *Smithsonian Miscellaneous Collections*, Vol. 30, 1887, Part Ⅰ., p.37.

[2] M.A.Henry, 同上, p.30.

[3] Am.Jour.Sci., Vol.22, 1832, p.408.

关于“额外电流”的研究是在1834年做的并发表于1835年。因此，发现自感的优先权显然是属于美国的物理学家。

亨利向他自己提出了这个问题：如果电能产生磁，磁就不能产生电吗？他在奥尔巴尼学院拿出了他的“定量”磁铁，在它的铁心中部绕上细铜线圈，细铜线的两端跟40呎远的电流计相接。把这铁心横穿过磁体的两端；把电池的两块极板浸在稀酸里，磁被激发起来，而电流计的指针突然发生偏转；解答出来了，磁能够产生电。象法拉第一样，亨利惊奇地看到只有瞬时效应，而且当“断路”时指针的偏转和“接通”时的偏转方向相反。几乎有结论性的证据表明，这个实验是在1830年8月作成的，或者可以说是在法拉第做他的第一次关于磁电的实验之前一年[1]。亨利在1831年8月热情地准备好了一系列详尽无遗的实验。他开始做了一块大得多的磁铁，还做了一个大“卷筒”，目的是想得到一架能大量做功的机器——他在为做一架直流发电机而努力。但是在做完它之前假期就结束了。[2]

他重新开始实验不是在1832年8月，而是在6月！而这又为什么呢？他偶然看到一本杂志中的一段话，叙述到法拉第已证明磁能产生电。法拉第的实验仅仅作出了一个大概。亨利不能辨明法拉第比他领先到多大程度。他立即开始工作。利用他的旧仪器249 重复了上述简讯中所讲到的实验，并且急忙写出了一篇论文，发表在1832年7月《美国科学杂志》上。这篇论文包括了他在听到法拉第工作之前所作的实验，也包括了在此之后所做的实验。法拉第在1831年发表了他的磁电的发现。虽然几乎可以肯定，亨利的发现是在法拉第的发现之前，但在发表的日期上亨利被法拉第占了先。因此，优先权当然属于法拉第。在1837年亨利到了英国，并和英国的大物理学家们有了私交。亨利在参加法拉第的学

---

〔1〕 Mary A.Henry，同上页注〔1〕，pp.53 et seq.

〔2〕 Mary A.Henry，同上，p.54.

会活动时喜欢深思。法拉第和惠斯通表达了对美国物理学家的崇高敬意。在伦敦的王家学院，法拉第、惠斯通、丹聂尔和亨利有一次试图从温差电堆中放出电火花。这几个英国人作了尝试并失败了。亨利藉助于他曾经做过的绕着软铁片缠上长导线的效应的发现，做成功了这个实验。法拉第变得象孩子一样的狂喜，高兴地跳起来并高呼道："美国佬的实验好哇！"[1]

亨利在物理学的各个部门都进行了创造性的研究，但是所有他的这些研究中最完美的是1838年夏天在普林斯顿所做的关于不同等级的感生电流的那些实验。正如我们已经看到的那样，以电流感生电流是法拉第观察到的。因为法拉第的次级电流只能是瞬时的，所以它可以象原电流那样起作用并且它本身将在第三个线路中感生出电流，这一点决不是不证自明的。亨利证明了更高等级的感生电流是可能的。"已经发现，用一个小电池将会从三级电流发出对二十五个手拉手的人的电击。在手臂上还能感觉出五级电流的电击。"[2]

和更新近的电磁理论有重要联系的观测是亨利在1842年作出的。他证明，莱顿瓶的放电并不是一种简单的恢复平衡，而是一种逐渐减小到零的急速的相继的来回振荡。莱顿瓶的振荡放电在1847年被赫尔姆霍茨在他的论文《论力的守恒》中又一次作了证明。然而，萨瓦里在赫尔姆霍茨和亨利之前，早在1827年就从一个实验中作出了这样的结论。[3] 1853年，威廉·汤姆孙爵士不知道以往的研究，他通过理论和数学推导作出结论说，放电必定是振荡的。 250

〔1〕 *A Memorial of Joseph Henry*, Washington, 1880, p.506.

〔2〕 *Trans.Am.Phil.Soc.*, Vol. VI.(N.S.), p.303. 亨利的关于感生电流工作的十分详尽的叙述见 J.A.Fleming, *The Alternate-current Transformer*, Vol. I.

〔3〕 *Memorial of Joseph Henry*, 1880, pp.255, 396, 448.

变压器的设计

亨利1830年(？)的“定量”磁体和缠线铁心，以及在1831年使用的法拉第环(图20)可以看成是最早的一些变压器。受到亨利研究的鼓舞，C·G·佩奇(1812—1868)发明了现在称之为鲁姆科夫线圈的东西，他出生在塞勒姆(salem)，毕业于哈佛学院，1840年后在华盛顿专利局任审查员。他的最早的研究发表于1836年。1838年他制造了一个高速度完备的感生线圈[1]。其原线圈是粗铜线，次级线圈是很细的导线。自动锤的振动使水银接通电路和断电。为了缩短断路时的接触时间，佩奇在水银上面注上油或酒精。后来其他学者也提出了这种设计，并且人们通常把这归功于佛科。1839年，德国的J·P·瓦格纳和内夫第一次提出以铂接触代替水银接触。F·乌彭本就佩奇的线圈讲道：“佩奇用这个仪器所产生的效应比鲁姆科夫用他的仪器所产生的

251 那些效应要强得多，佩奇仅仅用单个格罗夫电池就成功地在二级线路上感生出如此高的电动势，以致于产生了通过一个真空管的电火花长达$4\frac{1}{2}$吋——虽然鲁姆科夫的发明引起了人们极大的和应得的重视，但他也没有达到这样的成果。”1850年佩奇制造了一个线圈，它产生了通过空气的8吋长的电火花，乌彭本说：“考虑到这一切事件，不能不令人感到惊讶，因为鲁姆科夫的线圈的发明还处在它的摇篮时期，而佩奇的仪器的可惊的输出功率甚至到1851年在欧洲还一点都不知道。”显然，线圈应该以佩奇的名字而不是用鲁姆科夫的名字来命名才对。

---

[1] 这在*Am.Jour.Sci.*，Vol.35,1839,p.259中作了描述。在这里画出了一种线圈图，也见Bedell，*Principles of the Transformer*,1896,p.291.Fleming，*Alternate-current Transformer*，Vol.Ⅱ.，1892,p.26.以及F.Uppenborn，*History of the Transformer*,1888,p.7.

鲁姆科夫（1803—1877）出生在德国的汉诺威。在1819年他到了巴黎，后来他在这里开办了物理仪器制造厂。一系列实验终于使得在1851年产生了闻名的"鲁姆科夫线圈"。它放出通过空气的2吋长的电火花。1858年他的一个线圈在法国电器展览会上得到50,000法朗的一等奖。[1]雅明说，鲁姆科夫为科学和慈善事业花费了他的全部收入，他死的时候几乎是一个穷汉。[2]

鲁姆科夫线圈是一种"开放磁路"型变压器，而我们今天的商用变压器，象法拉第的原环（图20）一样，是一种"闭合磁路"型的。这就是，后者的磁力线完全不通过空气，而是完全沿着更方便的铁芯通路。变压器或变流器是用于电灯系统或长距离的动力传输系统，它又由伐莱、雅布洛科夫、哈里森、C·T.布赖特和E·B·布赖克、弗朗蒂、齐珀诺夫斯基、戴丽、布拉西、高拉德和吉布斯、斯坦利等人作了发展。这样一来，法拉第和亨利纯粹出自于对科学的热爱而进行的理论研究，却成了现代最广泛的商业发展的基础，并且大大地有助于文明的进步和人类的舒适。 252

静电感应

我们回过头来看看伦敦皇家研究院的法拉第，我们发现，他在1835年以后就从事静电感应的工作。库伦和其他人假定"超距作

[1] 有些人曾主张这奖金应授与里奇（1814—1895），他是美国的物理仪器制造师，他曾改进过鲁姆科夫1851年的仪器，为了更好的绝缘，他把次级线圈分成许多段。这个分法是波根多夫先提出的。里奇的一种仪器于1857年在英国展出。据说鲁姆科夫得到了这些仪器中的一个，成功地复制了这种仪器，因而夺得了大奖。见A.E.Dolbear, Proc. Am. Acad.of Arts and Sciences, N.S., Vol.23, 1895—1896, p.359.

[2] Nature, Vol.17, 1877, p.169.

用”的理论，假定电荷是超距地彼此吸引和排斥而不受其间介质的任何影响。法拉第的想法是，这种观点是错误的。他认为，电的吸引和排斥是借助于绝缘介质的邻近微粒的分子作用而传播的，因此，介质参与了电力的传播。因此，法拉第把这样的介质命名为“电介质”。法拉第以实验使自己确信，感应不总是取在直线上作用的，而没有中间介质帮助的超距作用理论使我们相信感应必定是在直线上作用的；相反，感应是沿曲线作用并且是通过邻近微粒的作用而发生的。他把这些曲线称之为“力线”。他的实验证明，两个带电体之间的电力强度随着绝缘介质的性质而变化。这样，就导致他有现在称之为“电容率”的重要发现。卡文迪许在很早以前曾得到同样的结果，但是他把这些科学真理的253 珍珠隐藏下来了。法拉第的仪器原则上是其电介质可以改变的莱顿瓶，他用这个仪器比较了电容率。它是由两个同心球面组成的。在两个球面之间的空间可以充填任何所要求的物质。取空气作为标准的电介质，他发现在硫磺中电的吸引或排斥比它大2.26倍，虫胶大2.0倍，玻璃至少大1.76倍。法拉第的实验发表在1837年，自从1870年以后我们关于这方面的知识大大增加了，然而由于电的吸收，不同的研究者给出的各种物质的电容率的值显示出令人困惑的不一致。

在这些研究中法拉第创造了一种符号，此后在物理学教学中被普遍采用。我们指的是他的“力线”。他在1831年关于以铁屑显示〔力〕线的实验中第一次使用了这个术语。可是，“力线”的概念在他之前已为其他人所掌握，例如塞贝克[1]。在法拉第的论证中，“力线”代替了数学分析，因为他没有机会得到有关数学分析的知识。为了避免遵循那种曾经导致法国的数学物理学家泊松和安培取得成就的思想过程，他想出了“力线”来帮忙，在他的心目中，他仿佛清清楚楚地看见力线从固体中引伸出

〔1〕 参阅塞贝克的论文，在 *Ostwald's Klassiker*, No.63.

来[1]。法拉第的巧妙的符号不仅在技术中被采用，而且也为基本教学所采用。甚至于在最强烈坚持电磁超距作用理论的德国，法拉第的想法也被接受了；因为赫兹的实验进一步支持了麦克斯韦发展了的法拉第关于电介质理论的基本假说。[2]

光 和 电

254

法拉第通过思辨，相信在光与电或磁之间存在某种直接的关系。许多试图证实这种观点的实验都得到了完全相反的结果，但在1845年他的坚强信念最后得到了实际实验的支持。“我终于成功地使磁曲线或磁力线发了光并磁化了一条光线。”[3]法拉第使偏振光线通过一片放在由大电磁铁产生的强磁场中的“重玻璃”。用尼科耳棱镜就可以看出光波被周围磁体的作用所扭曲，以致它的振动在另一个平面上发生。他说：“不仅是重玻璃，而且固体和液体、酸和碱、油、水、酒精、乙醚、所有这些物质都具有这种能力。”关于光和磁之间的这种关系，惠威尔写信给法拉第评述道：“我不能不认为，这又是迈出综合阶梯的一大步，在这个阶梯上你已经攀登得如此之高而且又站得如此牢固。”

法拉第的强磁体和重玻璃使他能去证实他的另一个预言。在他看来，磁性仅限于铁和镍是离奇得难以设想。他知道铁的磁强度在很高的温度下减少了，因而猜测别的金属可能在较低温度下显示出磁性。早在1836年他做了把金属冷却到－50℃时的实验，但是没有结果。在1839年他重做了这个实验，使金属冷却到

[1] 见 Clerk Maxwell, “Action at a Distance,” *Nature*, Vol. 7, 1872—1873, p.342.

[2] 见 A.Schülke in *Zeitschr.f.Math.Unterricht*, Vol, 25, p.403.

[3] B.Jones, 同p.222注[1]. Vol.Ⅱ., p.195. 也见*Experimental Researches*, 19th Series.

－80℃，但还是没有结果。1845年，他把钴列入磁性物质一览表中。最后，在1846年他发表了全部成果。1845年11月4日，他用丝线把一块重玻璃棒吊在他的新的电磁体的两极中间。当磁体被激发时重玻璃受到两极的推斥以致取赤道位置。法拉第用别的物255 质做实验，并发现，所有的液体和固体都会被吸引或排斥，只要利用了足够的磁力。硫磺、橡皮、石棉、人体的组织是被排斥的——这表明它们是抗磁体。法拉第说："如果一个人象穆罕默德在棺材中那样处在磁场中，那么他会转动身体，直到横穿磁力线为止。"[1]抗磁现象在这之前已被观察到，但是法拉第并不知道那些实验。布鲁格曼斯、A·C·贝克勒尔、贝利夫、塞格和塞贝克都曾指出过磁体对于两三种物质有斥力。惠斯通请法拉第注意贝克勒尔关于物质的磁性的研究，法拉第回答道："奇怪的是，他怎么会在如此接近发现伟大的原理和事实的时候，竟如

---

〔1〕 1853年伦敦的公民因三个熟练的魔术师的"灵动桌子术"而大为惊动。人们没有作适当的研究，就把这种效应归结到电、磁、或者是某种未知的能影响无生命物体的物理力。法拉第注意到这个问题并写下了如下一段话："我例外地没有在桌子术中转动桌子方面作过工作，我也不会做那种事情，但是那么多质问不断地向我发来，以致我想到最好是让大家立刻知道我的观点和思想，以便阻止这股逆流。就人的思想而论，应当知道我们的世界是多么软弱、轻信、怀疑、不信任、迷信、卤莽、怯懦，是多么可笑。"法拉第抱怨一个伟人，这个伟人认为灵动术是由于"一些未知的物理力，然而没有研究是否已知力还不充分；或者这个人甚至把灵动术归结为魔力或神力，而不是中止作出判断，或者是承认他们自己在这些事情上知识不够、不足以对作用的本性作出决定。我想，在这个课题上发现了在一些非常重要的原则问题上，我们国家的教育制度留在公民的精神状态方面的东西肯定有严重的缺陷。"——B.Jones，同222页注〔1〕，Vol.Ⅱ.，pp.300—302.

此彻底地把这二方面都忽视了，并且倒退到古老陈腐的先入之见中去。”[1]

光的电磁理论

258

大约从安培时候起，一些新的电学理论就提出来了。[2]早期的理论忽视了电介质的作用，而是假定存在一种或两种电的流质，并且不考虑能量守恒原理。法拉第对电介质感应的认识“或许是电学理论中作出的最重要的一步。”我们已经看到，他之所以有这个认识，是由于他渴望尽可能地废除在他那时候非常流行的超距作用的观念。因此，他的研究给超距作用以致命的打击。天才的麦克斯韦为要最终建成光的电磁理论，用数学语言表达了法拉第的思想，并且对它作了更全面的发展。

麦克斯韦（1831—1879）出生在爱丁堡，他在年轻时就得到

---

[1] 在创造“抗磁”(diamagnetic)和“顺磁”(paramagnetic)这两个词时，法拉第请教过惠威尔，惠威尔在1850年的一封信中写了如下的话：“听到您需要新词汇时，我总是感到高兴，因为这种需要证明您正在追求新的思想……。修辞癖者当然对于对立或协调‘铁磁’(terromagnetic)和‘抗磁’(diamagnetic)两个词表示反感。由此看来，有两类磁体，一类磁体的长度是和地磁力线相平行或相一致；另一类磁体的长度和这样的地磁力线横向相交。对于后者保留前缀‘抗’(dia)；对于前者可以用‘顺’(para)或‘类’(ana)这样的前缀，或许用‘顺’好些，因为在‘平行’‘顺着’(parallel)这个词里包括了记忆它的方法。”见I.Todhunter, *William Whewell*, London, 1876, Vol. II., p.363.

[2] 参阅J.J.Thomson, “Report on Electrical Theories,” *Report of the Brit.Association*, 1885, pp.97—155; Helmholtz, “On Later Views of the Connection of Electricity and Magnetism,” *Smithsonian Report*, 1873.

了成长的好机会，并很快就显示出他的数学和物理学研究的才能。在他15岁时，他就发表了一篇关于卵形曲线的论文。他参加过在爱丁堡举行的皇家学会的会议。1847年他见到了偏振棱镜的发明者尼科耳，同时开始对偏振光的研究感兴趣。坎贝尔教授说：[1]他们在爱丁堡学院的教育是与"当时的需要相适应的"等等，他们认为，他们应当有"物理科学"课程，这是值得想望的。因此，一个第一流教师给了他们教科书以外的知识。我只清楚地记得这些时候的一件事情，麦克斯韦和泰特关于这门学科的知识似257 乎比我们的老师知道得还多。在1847年秋天，麦克斯韦上了爱丁堡大学，在这里跟凯兰（Kelland）学数学，跟福布斯学物理学，跟哈密顿爵士学逻辑学。福布斯允许他自由使用教室里的基本实验仪器，他在没有任何助手和管理人的情况下用物理和化学仪器工作。1850年麦克斯韦进入剑桥大学，他在这里获得了第二名的甲等数学优等生。这时以及以后，麦克斯韦喜欢作古诗，并把它送给他周围的朋友传阅，"即使是他一个人，高兴时也顽皮地发笑，没有人比他更自得其乐。"[2]麦克斯韦在1856年在阿伯丁(Aberdeen)的马里斯查尔学院(Marischal College)，1860年在伦敦国王学院，1871年在剑桥大学当物理学教授。

在1861年和1862年发表的关于《物理力线》的论文，以及在以后的论文中，他把法拉第的理论翻译成数学语言并且发展了这个理论，按照这个理论，电磁场的能量存在于电介质之中以及导体之中。法拉第曾讲道："感应看来是在于起作用的带电体使一些微粒进入某种极化状态，这些微粒是带正电或负电的质点或部分……，这种状态肯定是一种受迫状态，因为它只是由于一种力

〔1〕 L.Campbell and W.Garnett, *Life of James Clerk Maxwell*, London,1882, p.85；我们还引用了 R.T.Glazebrook, *James Clerk Maxwell and Modern Physics*, New York, 1896.

〔2〕 他的诗见 L.Campbell and W.Garnett，同上，pp.577—651，特别是他模仿丁铎尔的贝尔法斯特讲演（Belfast Address）。

而产生和维持，并且当那种力消除时就恢复到正常的或静止的状态。”麦克斯韦改变了法拉第的术语，他用由“电位移”构成的变化代替电介质的极化。他把电介质的作用看成是类似于弹性体的作用，当外力消除时弹性体跳回到它原来的位置上。电位移中的变化是一种电流，被称之为“位移电流”；以区别于导电中的电流，即“传导电流”（赫兹以不容置疑的实验证明了这些“位移电流”的存在）。在介质中要是受到这样的电位移，就可以产生周期性的位移波。这样一种波的速度非常接近于光速。因此，“在空气中磁介质的弹性和光介质的弹性相同，如果这两种介质同时存在，同时传播的话，那么这两种相等弹性的介质只不过是同一种介质而已。”电磁现象和称之为光的现象在同一种介质中都有它们的地位，并且事实上其性质也相同，这是麦克斯韦在他的1873年发表的伟大著作《论电和磁》中精心阐述的理论。〔1〕尽管这理论和任何已观测到的事实都不矛盾，但麦克斯韦本人在论证它的时候只有少数非决定性的判断标准作为依据，但是他的伟大预言被杰出的赫兹用实验证实了。

258

赫兹的电磁波实验

赫兹（1857—1894）〔2〕出生在汉堡。在离开中学以后，他

〔1〕 人们总是发现这本划时代的著作难以理解。彭加勒(1854—1912)这样写道，“最完全地揣摩了麦克斯韦的含意的那些法国学者中的一个曾对我说，‘除了什么是带电物体以外，我理解这本书中的每一件事。’”赫兹把他自己的意思表示如下，“不管一个人多么热情地投身于麦克斯韦著作的研究上，即使他没有被罕见的数学困难所绊倒，然而也不能不放弃对麦克斯韦的观念形成他自己的前后一贯的观念的希望。我自己的遭遇也不比这好些。”——*Electric Waves*, trans.by D.E.Jones,p.20.

〔2〕 H.Ebert in *Electrician*(London), Vol.33,1894,p.272. 也见 H.Bonfort 写的简介，在 *Smithsonian Report*,1894, p.719.

就自修土木工程。二十岁时是他一生的转折点，他从一个实践者转变成为一个学者。他来到柏林，并在赫尔姆霍茨的指导下提高得很快。1880年他成为赫尔姆霍茨的助手，1883年在基尔（Kiel）259 当私人教师，1885年在卡尔斯鲁厄（Karlsruhe）的高等技术学校当物理学教授，他在这里完成了他的值得纪念的关于电磁波的实验。1889年他在波恩继任克劳修斯的职务。这样，他在32岁时就担任了一般人要在晚年才能得到的职务。1892年，慢性血液中毒开始损害他的健康，他在正当壮年时期就去世了。

1888年，赫兹发现了检测从莱顿瓶或线圈火花产生的电磁波的方法。这是麦克斯韦耽心决不能实现的成就。在莱顿瓶或霍尔兹（Holtz）电机的振荡期间，电磁波辐射到空中。这样的波被称之“电磁波”是因为它具有两种成份——一种是电波，一种是磁波。赫兹能够分别观测每一种波。如果电磁波落到反射镜上（例如一块大的薄锡板），那么它们就被反射回来，这两束在相反方向运动的波的干涉产生了极小和极大扰动的地方（波节和波腹）。赫兹的验波器仅有一个圆形导线组成，导线的两端接到两个黄铜钮上，黄铜钮之间的距离要调节到很小。当波落到导线上时，在适当的条件下会产生细微的火花通过两个铜钮之间。赫兹成功地使这些波发生反射、折射、衍射和偏振。赫兹说：“这些实验的目的是要检验法拉第一麦克斯韦理论的基本假说，而实验的结果是证实了这个理论的基本假说。”[1]电就这样兼并了光和“辐射热”的整个领土。

---

〔1〕 赫兹的论文收集在 ***Electric Waves*** 一书中，由D.E.Jones翻译，1893年版。在Fleming, *Alternate-current Transformer*. Vol. I.，在Preston, Theory of Light 中对赫兹的实验作了完满的叙述。也见O.J.Lodge, “The Work of Hertz”, *Nature*, Vol.50, 1894, pp.133—139, 160, 161; Poincaré, “On Maxwell and Hertz”, in ***Nature***, Vol.50, 1894, pp.8—11.

在赫兹发表了他的结果以后，他知道了英国的实验家已在类似的路线上作着这方面的工作。他说："请允许我在这里报告由 260 两个和我同时致力于同一个目标的英国同行所做的很好的工作。在我完成上述研究的同一年，利物浦的洛奇教授研究了电闪导体的理论，并与此相联系，进行了一系列关于小电容器放电的实验，这些实验引导他观测了线路中的振荡和波。既然他完全接受了麦克斯韦的观点，并且很热切地致力于证实它，毋容置疑的是，如果我们没有比他领先的话，他也会在观测空中的电波方面获得成功，因而也会证明电力随时间的传播。都柏林的菲兹杰惹教授在几年以前藉助于理论力图预言这种波的可能性，而且力图发现产生它们的条件。我自己的实验没有受到这些物理学家们的研究的影响，因为其后我才知道它们。"[1]

自从赫兹实验发表以来，一些新的检测莱顿瓶或线圈电火花的电磁辐射的检波器被发现了。对我们发现流电作出了贡献的蛙腿也曾被实验过，可是得到的结果是很微弱的。小盖斯勒管用于代替赫兹接收器或共振器的微小的空气隙缝。然而最有用和最精巧的装置是"金屑检波器"，它的发明是依靠巴黎天主教学院的布兰昌[2]，和利物浦大学学院的洛奇[3]两人的独立观测。如通常所制造的，它由一种锉屑（铁屑就很好）管组成的，把它放在带有伏打电池和电流计的线路中。锉屑产生高电阻，可是一旦电波到达金屑检波器，由于电通过锉屑之间的接通过程电阻就被击穿，电池的电流增加和产生了电流计的大偏转。对赫兹振动器或波辐射器的改进是由波洛尼亚的里纪（1850—1920）作出的[4]。 261

[1] Hertz, *Electric Waves*, trans by D.E.Jones, p.3.

[2] *Comp.Rend.*, Vol.111, p.785; Vol.112, p.90.

[3] *Nature*. Vol.50, pp.133—139.

[4] *Electrician*(London), Vol.39.1897, p.686; 也见 O.Lodge, "History of the Coherer Principle," *Electrician*, Vol.40, 1897, pp.87—91.

磁的理论

我们已经知道，安培观察到螺旋管象磁体一样的作用时，就提出了磁的理论。按照这个理论，所有的磁体不过是电流的聚集。他设想，围绕每个分子有一个微弱的电流在不停地流动着。由于这样的假设不能用实验来证实，并且由于它多少有点幻想的味道，以后的理论家们满足于泊松(1781—1840)的假定或韦伯的假定。泊松假定，当电场开始作用时每个分子都磁化了；韦伯假定，单个微粒都是永久磁性体。韦伯没有试图解释这种磁的起源。他提出了这样的观点：在硬钢中分子之间有某种摩擦，这些摩擦阻碍磁化钢分子恢复杂乱无章的位置。那时剑桥大学的攸英稍微修改了韦伯的理论，并表明，只要考虑到有磁性的分子必然彼此施加作用力，就能完全解释这个现象。他配制了一批象磁针一样装上枢轴的磁体，因而每个磁铁都能自由转动，除非是每个磁体由于其它磁体的存在而被束缚住。用一个可以随意变化其强度的电磁铁作为外部磁化力。运用这个模型，攸英能模拟铁的磁化现象——用一个弱的磁化力，磁性是怎样缓慢地得到的，然后，随着外部力的增加，有一会儿铁很快就获得了磁性，但是到接近第三阶段时，磁性增加的速率减少了，并且铁接近饱和状态[1]。如果现在磁化力逐渐减小，而模型又象一块铁的样子，起初磁化强度的减弱是缓慢的，然后开始不稳定状态和磁化强度急剧减少。当外力完全撤消时，留下了稍许的剩余磁性。倘若磁化力作用在相反方向上，极性的倒转就突然发生。攸英说："这样我们找到了，当铁或其它任何磁性金属通过一轮磁化过程时所观测到

262

[1] 参阅 Ewing, "The Molecular Process in Magnetic Induction," *Nature*, Vol.44, 1891, pp.566—572. 再版于*Smithsonian Report*, 1892, pp.255—268.

的全部特征的一种很相似的模拟。任何这样过程的结果在表示磁性和磁化力关系的曲线中都形成一种回线。磁的变化总是退后于磁化力的变化。这种滞后趋向被称之为磁的滞后现象。”当铁被磁化时，能量就给了铁；当铁退磁时，能量从铁中放出。当磁化是循环变更时，有一种净耗损，或者更确切地说是能量消耗（转化为热），消耗的能量正比于回线的面积。攸英这样解释这种发热：“当分子变为不稳定的和激烈翻滚时，它就发生了振荡并使邻近分子发生振荡。”热是由于这些振荡的结果。当受热时，人们发现铁更容易导磁，直到达到一个高温阶段磁性几乎突然消失为止。这种磁导率的增加似乎是由于膨胀，所以一些分子的中心间距增大，也由于分子已处于振动状态之中的事实。因此，分子更容易从一组排列翻转到另一组排列。至于磁性的消失，攸英说：“在更高的温度下突然失去磁性，无论是否由于振动变得如此激烈以致分子发生自旋，至少这是一种值得考虑的推测，当然，此时它们的极性不会对产生磁化有所裨益。”

263

铁和钢的磁性研究从发电机、电动机和变压器的设计者的需求受到强有力的刺激。罗兰最先从事于在给定的一块铁或镍中精确量度各种磁化力对磁化结果的关系。我们说说他那时代的这位第一流的美国物理学家的生活概略。[1]

罗兰（1848—1901）出生在宾夕法尼亚州的洪斯代尔。当他是个孩子时他就表现出对科学的热爱和讨厌拉丁文和希腊文。1870年他作为一个土木工程师毕业于纽约的特罗伊（Troy）的伦塞勒（Rensselaer）综合科技学院。一年以后他回到学院当物理学讲师。在他发表了几篇次要的论文以后，他着手研究铁的磁性，正如他写给他姐姐的信中所说，他希望从这项研究中得到“真正的好名声。”然而他的思想在那时是如此新奇，以致他的

〔1〕 概略见 Tomas C.Mendenhall, *Report of the Smithsonian Institution for* 1901, p.750.

论文由于不为人所理解而一再被退回。在这时麦克斯韦的精彩的著作《论电和磁》的刊行引导罗兰把他的论文寄给麦克斯韦，麦克斯韦肯定有能力来判断它的价值。麦克斯韦热情地接受了这篇论文并立刻把它发表在1873年8月份的《哲学杂志》上。罗兰的实验是以绝对量度表示其结果的关于磁的第一项研究；其论证是以法拉第的磁力线理论的语言进行的。罗兰指出，通过磁体的磁力线流可以被准确计算，并且其定律“类似于欧姆定律”。表示磁化力和产生磁化结果之间的比例的“磁导率”一词是由开尔芬勋爵提出来的。罗兰的论文在国外受到重视。当吉尔曼校长在创办约翰·霍普金斯大学时，他曾征求过麦克斯韦关于由谁填补物理学缺位的意见。麦克斯韦推荐罗兰。当时吉尔曼作为访问董事会成员到西点军校时，该校的米基高度评价罗兰。吉尔曼用电报邀请罗兰到西点军校，他和罗兰在哈得逊河畔散步和交谈，吉尔曼说：“他告诉我，他的科学之梦；我告诉他我的高等教育之梦。”罗兰被聘请了，但允许他到欧洲进修一年。他在柏林的赫尔姆霍茨实验室住了几个月。当时他在那里完成了关于运动静电荷的磁效应的非常困难的实验。这个实验的理论意义随着电子论的出现而日益增长。转动着的静电荷对磁针有影响，其作用类似于电流。他的结论被认为有问题，一些实验家得到了否定的结果。罗兰自己在1889年重复了并在1900年又重复了这个实验。到那时它的正确性已得到承认。在霍普金斯大学他培养了一批年轻的物理学家。他不适应于课堂上的日常工作。研究生主要是依靠他们自己的才智。当有一次问到关于研究生问题——“你和他们一起作什么？”罗兰答道：“和他们一起作？我应该不管他们。”然而他是一个鼓舞人心的人，正如他以前的学生所证实的那样。他不容忍虚伪和欺骗。物理学家乔治·F·巴克尔有一次告诉瑞利勋爵[1]，他和罗兰访问费城的基利（Keely）的工场，基利声称，

[1] R.J.Strutt, Fourth Baron Rayleigh, *John William Strutt, Third Baron Rayleigh*, London, 1924, p.146.

该工场以只有他自己知道的非常神奇的动力才能带动马达。一些显然惊人的效果是表演出来了，但罗兰猜想，似乎导线实际上是传递着压缩空气的空管。他跨步向前，要砍断这根管子以证实他自己的想法。但是，基利飞跑到他面前阻止他这样作，以致在地板上彼此滚打起来。在基利死了以后，这才证明他是以欺骗的手 265 段产生他的结果。

势的概念

在理论物理学中得到广泛应用的概念是势的概念。我们把它的起源归功于数学家拉格朗日和拉普拉斯。他们把它应用到引力问题中。第一个把势函数应用到另一类问题上的是**格林**（1793—1841），他把它引进电和磁的数学理论中。他的1828年的论文，甚至英国数学家也要到开尔芬勋爵于1846年重新发现它之后才开始注意。同时，格林的所有的普遍定理都被开尔芬勋爵、查斯利斯、施特姆和高斯重新发现了。数学家们把势定义为这样的函数，它对座标轴的微分系数等于沿着那条轴作用的力。当能和功的概念开始居于物理学家心目中的更加重要的位置以后，“势”这个词就被解释为表示已做的功或已获得的能。例如：“在任何一点的电势是把单位电荷从无限远移到该点时必须耗费的功。”这个说法被用在基础教育中，并且经常用它类似于温度或水平差来作解释。

地　磁

在哈雷以后，蒙泰因、多德森、贝林和丘奇曼发表了画有地磁偏角的航海图（费城，1790年；伦敦，1794年）。至于地球的磁极数目问题继续在激烈地辩论。克里斯提安尼亚（Christiania）天文台的台长**汉斯滕**（1784—1873）在1812年试图解答丹麦皇家科学院的有奖赛题，这题目就是：“为了解释有关地磁的事实， 266

有必要假定一个以上的地球磁轴吗？”他持肯定的观点。他把地磁作为他终生研究的题目，他致力于把全部观测作数学分析，抱着严密地验证哈雷关于地球有四个磁极的观点。他从等磁偏角线的长期变化中推断出有两个斜向西方运动的北磁极，和两个向西方运动的南磁极；所有这些磁极回到同样的相对位置的最短时间近似地吻合岁差运转的周期。“靠挪威政府的慷慨的施舍使他能够和杜、以及厄曼一道到西伯利亚去研究亚洲磁极的理想极点。1828年4月25日，他们从柏林动身……由于洪堡的建议在俄罗斯帝国建立了磁性观察站，高斯、赛宾、拉蒙等人从汉斯滕和厄曼所收集的材料中获得了许多重大的成果。汉斯滕没有争议地确认在西伯利亚存在有一个磁极，它补充了在英属美洲的那个磁极，并且还研究了地磁的二轴性。”[1]北半球的地磁在两个地方达到最大，也即是说在加拿大北部和西北利亚北部最大，这一事实结论性地证明地球不是一个单磁体。可是，不论是汉斯滕的理论，还是E·赛宾（1788—1883）爵士的理论都和较近年代的观测不相符合。地磁和它的长期变化的起因仍然是一个秘密。[2]

绝对测量单位

朝向精确研究地磁的重要一步是由德国的高斯(1777—1855)作出的，他跟洪堡（1769—1859）一起组织了《德国磁学联合会》。它的课题是在固定点继续观测磁的要素（俯角、偏角、强度）。观测开始于1834年，大部分约在1842年做出了结论。高斯和哥丁根的韦伯（1804—1891）设计了一种用于这些测量的仪器。高斯的理论目的不在于研究地磁的起因和它的变化，而仅仅

267

〔1〕 Proc.Roy.Soc.of London,Vol.24,1875—1876,p.V.

〔2〕 参阅A.W.Rücker, "Recent Researches in Terrestrical Magnetism,"Nature,Vol.57,1897,pp.160 et seq.

是关于地球表面的磁分布的一种数学表示法。

一些思辨经常是沉溺于太阳和地球之间的电磁关系。但是那时举不出很有结论性的东西。[1]

高斯在1832年宣读的一篇论地磁的论文中，提出了绝对单位制。因为所有的力都可以用它们所产生的运动来量度，只有三个基本单位是必须的，即长度单位、时间单位和质量单位。要得到的好处就是：如果所有的实用单位都从这三个基本单位中推导出来，那么所有的度量结果都可以彼此比较。高斯把单位质量在单位时间里的单位速度取作力的单位。他把在单位距离内的相等量发出单位力的作用取作磁场强度的单位。高斯在测量地磁上使用的绝对单位导致他的同事哥丁根的韦伯采用电的绝对单位。韦伯关于这个问题的最早的一些论文发表于1846、1852和1856年。圣彼得堡的M·H·雅科比推荐以一根给定大小的铜导线作为电阻的实用单位，韦伯用绝对单位电阻测定了这根导线的电阻。因为已发现铜的电阻随时间而起变化，所以柏林的西门子(1816—1892)在1860年提出以一根在0°C 时的一米长、横截面为一平方毫米的水银柱的电阻作为实用电阻（“西门子单位”）。韦伯把这定义为绝对单位。1861年英国协会和伦敦皇家学会任命了以开尔芬勋爵为领导的一个委员会来推荐一种单位（“B·A单位”）。韦伯的电阻绝对单位是速度。英国委员会原则上采用了这个单位。1881年在巴黎召开的国际电气工程师会议保留了韦伯的绝对制；不过，选取厘米·秒·克代替了韦伯和高斯所采用的毫米·秒·毫克作为基本单位。该会议还选择了每秒一厘米的速度的 10^9 倍作为欧姆。在这次会议上，按韦伯早先作出的路线还作出了伏特· 268

---

〔1〕参阅Frank H.Bigelow 作的“Abstract of a Report on Solar and Terrestrial Magnetism,”*Bulletin No.21, U.S.Depertment of Agriculture*, 1898.

安培·库伦和法拉的定义。[1]"篇纲方程"是由麦克斯韦第一次系统地提出的。

要得到一个方便的、不变的、等于10^9绝对单位的电阻曾是一件困难的事。B·A单位有点太小了。"法定的欧姆"被1881年的会议委任的委员会在1883年临时采用。它是0°C时106厘米长、横截面为1平方毫米的水银柱的电阻。象瑞利和马斯卡尔特那样出色的研究者认为，这个水银柱有点太短了。但是一些实验家得到一些较小的值，这导致采用106厘米的平均值。"法定欧姆"不能满足任何一个人，并且没有在任何一个国家成为法定单位。[2]

在指出早先所做的一些测定中的错误以后，罗兰发现，该水银柱的长度是106.32厘米。在1892年英国协会的会议上，德国、法国和美国的物理学家应邀参加讨论电的单位。"B·A单位"和"法定欧姆"被放弃了，"欧姆"被定义为106.3厘米、在恒定横截面下质量为14.4521克的在熔冰温度下的水银柱的电阻。以指定水银的质量代替水银柱的截面，就可以避免由于在0°C时一克水银柱的精确体积的不确定性所产生的任何错误。在1893年世界博览会期间在芝加哥举行的会议采用了国际单位制。1892年定义的欧姆成为国际欧姆。其它的单位，包括功的单位为焦耳，功率的单位为瓦，以及自感的单位为亨利都被规定了。

269

部分真空中的放电

人们在本世纪中期以后对部分真空中的放电进行了仔细的研究。1853年巴黎的梅森使高功率的鲁姆科夫线圈通过托里拆利

[1] Rosenberger，同19页注[2]Ⅲ.，pp.302，514—519；A.Kiel，"Geschichte der Absoluten Masseinheiten，" *Jahresb.d.Königl.Gymnasiums zu Bonn*.1890.

[2] H.S.Carhart，*Science*，Vol.21，1893，pp.86，87.

真空放电。加西奥特随即制造了含有各种痕量气体的一些实验研究用管子。几年以后，盖斯勒（1814—1879）开始制造这样的管子，其技艺是如此高超以致此后人们称之为“盖斯勒管”，盖斯勒先是蒂宾根的一个吹玻璃工，后来成为波恩物理和化学仪器制造厂的老板。盖斯勒管的名称是由普吕克尔提出的，他说：“我恰如其分地给这些管子以这个名称，虽然第一个管子不是由盖斯勒本人制造的。”[1]通过这些管子的放电是很美的，但是很难对电或气体理论提供更深入的理解。随着水银空气泵的改进和得到更高程度的真空，放电现象才在广大的范围出现。明斯特（Münster）的希托夫在1869年注意到分隔阴极和阴电辉的暗区在宽度上增加了，随着抽气工作的进一步进行，暗区最后充满了整个管子；阴极放电在这管子对面产生了相当的荧光。**克鲁克斯**于1878年开始公开的实验更为惊人并给人以深刻印象。他的高真空实验开始于1873年，当时，在研究铊原子量的过程中，为了避免空气浮力的影响，他试图在真空中实现精密的称量。当他在抽空的金属箱里称量加热了的物体时，天平的行为显示出不规则性，这是他用不同温度下产生的空气流所不能解释的。克鲁克斯着手彻底研究这一现象，并导致他在1875年发明了有名的辐射计。克鲁克斯和其他人起初倾向于这种意见，即认为轮叶的转动是由于以太波的直接冲击。但是，克鲁克斯成功地把管子抽到这样高度的真空，以致轮叶不再转动。因此，泰特、杜瓦和他本人祈求现代气体分子运动论的帮助，并把这种效应归因于残存气体分子的作用。当分子碰撞在热的轮叶黑面上时，就以增加了的动量弹回，并以它们的反作用推动着轮叶。麦克斯韦根据气体运动论对这种作用做了数学研究。在1878年克鲁克斯接触到希托夫的研究路线，他显然不知道希托夫的研究。被他和希托夫观测过的暗区的宽度被他理解为“残余气体的分子在相继碰撞之间的平均自由程

270

[1] Rosenberger, Ⅲ., p.521.

的量度。”在他的高度抽空的管子里“各种气体的残余分子”能以比较少的碰撞穿过管子，而且能以巨大的速度从电极上射出，它们所显现的性质是如此新奇和如此独特，好象完全证明了从法拉第那里借来的所谓“辐射物质”以直线形式行进，当以固体物质遮断它时就产生了阴影，它能转动一个小叶轮，并被磁体偏斜（希托夫和其他人早先证明过这点）。在克鲁克斯高真空管里这种残余气体的状态和行为是这样的，即他认为，他自己证明把它称之谓“超气体状态”或物质的“第四态”是正当的，它很不同于从液态中产生的那些气体。“第四态”的理论受到许多批评，特别是受到德国人的批评。

271

伦琴射线

在加西奥特的时期阴极放电是最受注意的课题，后来阴极放电又垄断了人们的兴趣。赫兹发现“阴极射线”会穿过金属箔。他的助手勒纳制造了一个带有小铝铂窗的真空管，他使“阴极射线”通过这个窗口打进空气之中。它们却仍然保持有激起磷光的能力，但只能在空气中运行一段短距离而不能长期在空气中运行。勒纳认为，他的射线不是正在飞行中的微粒，而是“以太中的现象”。[1] 当人们关于这些神秘射线的性质的讨论正在进行过程中，维尔茨堡（Würzburg）的伦琴（1845—1923）[2]在1895年发现了一种新型的射线，它立刻引起了全世界的轰动。他发现，克鲁克斯管在发射一种辐射时引起了一张涂有氰化钡铂的屏闪闪发光或发荧光。对于普通光线不透明的纸、木头、铝和许多其它物质，对于新的辐射却是透明的。对于动物组织是透明的

〔1〕 勒纳的论文见 *Electrician* (London), Vol. 32, March 23, 1893; Vol.33, 1894, p.108.

〔2〕 Röntgen, "On a New Form of Radiation," *Electrician* (London), Vol.36, 1896, pp.415—417, 850, 851.

而对于骨骼多少是不透明的这一事实使得给人的骨架进行照相成为可能，这种照相所得到的底片具有阴影图象的性质。新射线的本性当时是不知道的，伦琴称它们为“X射线”，但人们通常并且更恰当地称它们为“伦琴射线”。它们既不显示出可知觉的折射，也不显示出规则的反射和偏振。J·J·汤姆孙做了一个实验，这个实验似乎证明伦琴射线和阴极射线是不同的，因为真空管内的阴极射线没有使照相底片感光的能力。他又发现，这些射线使绝缘导体导电，并因此能使带电体放电。改进了的管子——所谓的“聚焦管”——是为射线照相术设计的。工艺和应用技术学校的亨利·贝克勒尔（1852—1909）在1896年于巴黎作出了重要的发现，这发现看来是朝向于建立老的和新型辐射之间的连续性的链环。亨利·贝克勒尔是埃德蒙·贝克勒尔的儿子和继承人，是A·C·贝克勒尔的孙子。他观察到某种铀化合物在太阳光下曝光以后发出类似于伦琴射线的辐射，它能穿过铝板或硬柏纸板，而且它又能被折射和偏振。和这两种射线相类似的是由钍和它的化合物所发出的射线，它们是由斯克洛多夫斯卡·居里和G·C·施密特两个人几乎同时发现的。钍射线能被折射，但不能透过电石而被偏振。 272

感应起电机

有两种方法能产生非常高的电动势：一种是象鲁姆科夫的感应线圈的方法，另一种是用感应起电机。这些机器是从伏打的起电盘演化过来的，从头到尾的许多改进应归功于哥丁根的利希滕伯（1742—1799），伦敦的本涅特，卡瓦洛（1749—1809），尼科尔森（1753—1815）（伦敦《尼科尔森自然哲学、化学和工艺杂志》的编辑），贝利，伐莱，开尔芬，推普勒，霍尔兹，维姆胡斯等人。 273

在设计这些机器中的第一个显著进展是在1865年作出的。在

那年多尔帕特（Dorpat）的推普勒（1836—1912）和霍尔兹制成了一些感应电机，推普勒后来是德累斯顿（Dresden）综合技术学校的教授。霍尔兹不久就改进了他的机器，而推普勒在1879年把这两种机器的原理合成"推普勒-霍尔兹机"。类似的机器是在1880年由柏林的机械师J·R·福斯制造的。霍尔兹在1881年描述过一种带有锡箔辐条和接触刷的电机[1]，这种机器又在1882年和1883年被维姆胡斯[2]描述过，他独立地与霍尔兹无关地做出了他的一些改进。[3]

温　差　电

温差电是塞贝克（1780—1831）在1821年发现的。他出生在雷维尔（Reval）（俄罗斯爱沙尼亚）。在他17岁时他就离开了自己的祖国，此后从未再回去过。他在柏林研究医学。他手头宽裕，可以自由地使自己专心于科学。从1802到1810年他住在耶拿（Jena），并和谢林、黑格尔、李特、歌德和其他名人有私交。不幸的是，对于颜色的看法他让自己完全被牛顿的错误观点所支配，歌德在他的《色论》一书中精心而又自信地叙述了这种错误的观点。在1818年他被选为柏林科学院院士的同时，他开始定居在柏林。奥斯特的实验诱使他进行了一个很长系列的电学研究。为了验证关于电流的磁性的某种思辨，他建成了由部分铜和部分铋组成的电路。他把一个金属结握在手里。他使自己确信由于他的手的热引起的金属结的温差而使电流计指针发生偏转。他通过

〔1〕 Uppenborn's *Zeitschr.f.angewandte Elektr.*, 1881, p.199.

〔2〕 Engineering, Vol.35, 1883, p.4.

〔3〕 参阅Holtz, Wimshurst and V.Schaffers著的有关新型感应电机理论的文章，*Electrician*(London), Vol.35, 1895, pp.382—388.也见John Gray, *Electrical Influence Machines*, Whittaker & Co.

冷却这些结中的一个而发现了类似的效应；这个效应随着不同金属而改变，并且温差愈大效应就愈大。他应用了“温差磁流”这个术语，并且后来对“温差电”这个术语表示异议。 274

塞贝克的发现以后十三年，一个巴黎的钟表匠珀耳帖（1785—1845）[1]把他的后半生献身于科学探索，他从另一个方向证明，电流不仅可以生热，而且它还会致冷。当电流从锑流到铜时，他发现在铜锑结上加热了10℃；而电流以相反方向通过时，铜锑结冷却了5℃。在铋锑结上人们发现了更大的温差。楞茨（1804—1865）利用珀耳帖效应成功地使水结冰，楞茨由于他的电磁感应定律是十分知名的。

直流发电机和电灯的发展

自从法拉第和亨利建立了电磁原理以后，人们在实际应用方面作了恒久的努力。早期的直流发电机有两个缺点：磁场强度不合适或者不能适当地应用；产生的电流不能充分稳定。1856年柏林的西门子由于用导线圈缠绕在带槽的铁芯上而改进了梭式电枢，实行了使磁力线集中在磁极间的强磁场上。十年以后曼彻斯特的H·维尔德用电磁体代替早先使用的永钢磁体。他拿了三个西门子电机，其中的两个是电磁体的。带有钢磁体的电机所产生的电流是用以激发第二个电机的场磁体；第二个电机的枢电流用于激起第三个电机的场磁体。这最后一个电机的电流用于为实验。电灯发出很强的光，这引起了人们极大的惊讶。当灯光通过 275 凸透镜时，它把纸点燃了。电弧不仅熔化了铁丝，而且还使6毫米粗61厘米长的铂金条熔化了。尽管早在66年以前，即1800年戴维爵士介绍过电弧、而且还在更早的时候李特也提到过它，但是

[1] 见“Memoir of Peltier,” *Smithsonian Report*, 1867, pp, 158—202.

一般人对电弧还是感到新奇。戴维在他的实验中用的是一个由2000个电池组成的电池组和炭棒。

1866年，西门子以他自己制造的一个新电机的运转证明了能够使用不要各个分离激磁机的电磁铁，并证明，场磁体可以用电机本身的枢电流来激发。这个观念看来曾经风行一时；因为，默莱，C·F·伐莱（1828—1883），C·惠斯通等人约在同时并且独立地提出了这种观念。在西门子的电枢里线圈绕着一个圆筒心。另一种典型的电枢是线圈绕着一个环。这是佛罗伦萨的帕奇诺蒂（1841—1912）在1861年发明的，巴黎的格喇姆（1826—1901）在1868年又独立地发明了它。由于格喇姆的努力，这种电枢得到广泛的应用。从他们那时起为各种目的制造的发电机达到了很完善的程度。西门子兄弟、布拉什、爱迪生和其他人制造了有很高价值的发电机。[1]

实用发电机的设计使电灯成为可能。在想出使电灯形成自动作用和多少又彼此独立的系列的方法以前，弧光电灯一直未能成功。这样的一种调节器是斯泰特在1847年发明的；后来西门子和其他人作出了许多设计。在这些设计模型中有发条装置的电灯、螺线管电灯和离合器电灯。

弧光灯对住宅照明用是不合适的。人们需要一种不太刺眼的灯。在1877—1880年期间发明家们由于白炽灯泡的生产处于非常时期。参与了电的应用的这个发展的人有英国的J·W·斯旺和莱恩-福克斯，H．S．麦克西姆、W．E．索里、A．P．曼和T．A．爱迪生。

276

在早期的实验中曾经试用过铂丝作为电流通路上热到发白光的物质。爱迪生在1878年就曾经这样做过，但无论是铂丝或是铱丝都不能避免被烧断的危险。在同一年，纽约的索里和曼试图从

〔1〕 详见S.P.Thompson (1851—1916), "Historical Netes", *Dynamo Electric Machinery*.

植物的组织中制造炭丝。他们用氮气注满灯泡以尽量防止碳纤维燃烧，但是这种处理没有成功。莱恩-福克斯在1879年由于深信铂和铱不能用作灯泡中的“桥”，便用炭化了的植物纤维。斯旺在1879年2月公开展出了在真空玻璃泡内装有碳丝的灯泡。斯旺的成功使爱迪生放弃使用铂和铱，并在1879年10月他制造了一个用灯烟和碳化沥青细丝的真空灯泡。1880年1月斯旺从棉捻线制成碳丝，把棉丝浸入硫酸中然后碳化而成的。爱迪生为了寻找灯泡的合适的纤维，派出了探险者到南极洲和远东，并在1880年以碳化的扁竹条作为灯丝用。现代的大部分灯泡的灯丝是使用羊皮纸化的纤维素、然后经过碳化而成的。几个实验家之间的竞赛的确是你追我赶，激动人心的；在新灯泡进入商品市场之前就发生了关于专利权的有效性问题的许多诉讼事件。[1]

关于发电机的作用不过是电动机的反作用，所以同一个机器可以或者用作发电机或者用作电动机，这一发现是M·H·雅科比在1850年作出的。作为一个发电机的机器到另一个作为电动机 277 的机器的发送功率的原理是首先由丰泰因和格喇姆在1873年的维也纳展览会上指出和证明的。从此以后，电动机的设计细节有了很大的进展。两个在巴黎做成的格喇姆电动机曾于1876年在费城的百年博览会上展出，之后其中之一被宾夕法尼亚大学购买了，另一个被珀杜大学购买了。

在美国和其它国家经过了许多关于电车设计的实验以后，第一架电车是由西门子和霍尔斯克（Halske）商号于1879年在柏林的工业展览会试行。[2]

---

〔1〕 详见 F.L.Pope, Evolution of the Electric Incandescent Lamp, 1889.

〔2〕 此时在美国，爱迪生、菲尔兹和韦林顿·亚丹斯都实验过电车，并申请专利。见 Welleigton Adams, “The Evolution of the Electric Railway,” p.9, 再版于 *Jour.of the Ass.of Eng.Societies*, of September and October, 1884.

在1883年以前，有轨电车的发展主要应归功于德国的西门子，但在这时实质性的提高是由于美国的范德波尔、达夫特、斯普拉格等人的功劳。

第一个多相电动机于1879年由W·贝利在伦敦皇家学会上展出。它纯粹是一种玩具，并且没有得到更多的注意。双相电动机是由费拉里斯(1847—1897)于1885年在都灵(Turin)他的实验室中制造并使用。他用了两个独立的同周期的交流电流，但相位不同，因而产生了旋转磁场。只有这位理论物理学家考虑到电动机需要两条以上的线路，除此以外没有任何人会对这个考虑感兴趣，费拉里斯直到1888年才发表他的成果。[1] 仅仅几个月以后，根据同样原理的商用电动机被那时在匹兹堡(Pittsburgh)的泰斯拉制成，他是独立地作出这个发现的。由多布罗沃尔斯基设计的大旋场电动机在1891年的法兰克福博览会上使用过。从此产生了许多这种型式的电动机，并且在欧洲和在美国两个地方日益得到广泛的应用。

278 电报和电缆

通过法拉第和约瑟夫·亨利的划时代的研究，电磁学原理已为人们所了解，在这以后，电报似乎是一种比较容易的事情了。如此之多的研究者带着这观念使他们自己忙碌起来，并且完成了或多或少成功的实验，以致于难于确定哪个人发明了电报。安培在1821年建议用电磁装置传递信号，哥丁根的高斯和韦伯于1833年在天文台和物理馆之间9000呎的距离内架设了原始的电报线。奥尔巴尼的亨利在1831年以电磁的吸引使远距离的信号可以听见。1837年纽约的莫尔斯设计了一种电报，这是用衔铁的吸引在

[1] 见译文，在 *Electrician*(London), Vol.36, 1895, p.281；也见 *Nature*, Vol.44, 1891, p.617.

移动的小纸片上产生点和线。慕尼黑的斯泰因海尔发现，地球可以作为回路的一根导线。由于莫尔斯的努力，第一个商用电报线在美国的华盛顿和巴的摩尔之间架设起来了。莫尔斯（1791—1872）曾被教育为一个艺术家，并且是纽约的国家设计学院的创始人。他曾在欧洲大陆的学校中研究过艺术。当他在1832年航海回国时，他第一次想到电报。他实验了几年稍有成功。最后，他的助手盖尔博士把亨利发现的原理应用到在一定距离内有效的莫尔斯电报机上。[1] 经过许多次挫折以后，莫尔斯在美国政府的帮助下，在华盛顿和巴的摩尔之间架设了电报线。1844年5月24日，信息从美国最高法院大厅发出："上帝创造奇迹！"[2] 莫尔斯的装置是现在世界上最广泛应用的装置。 279

关于海底电报的实验早在1837年就开始了。在一些较短的电缆试验成功以后，第一个横跨大西洋的电缆于1857年开始铺设。几年以前争论的问题之一是通过2000哩长的电缆、信号的可能速度如何。关于电运行的方式那时还存在很大的模糊之处。惠斯通在1834年藉助旋转镜证明，电以每秒288,000哩的速度运行；但是L·克拉克从在艾里和法拉第面前所做的关于800哩的地下线路的实验中作出结论：半秒钟的时间电流出现在另一端。其它的实验得到居间的结果。

这些不符被一个年轻人威廉·汤姆孙（后来称为开尔芬勋爵）在他给斯托克斯爵士的通信中作了解释。这些通信成为汤姆孙在1855年发表于皇家学会会报上的非常重要的论文根据。由他从理

---

〔1〕 见"Statement of Professor Henry in Relation to the History of the Electromagnetic Telegraph," *Smithsonian Report*, 1857, pp.99—106; William B.Taylor, "Henry and the Telegraph", *Smithsonian Report*, 1878, pp.262—360, 该文有许多关于电报史的详细内容。

〔2〕 详见W.E.Ayrton, "Sixty Years of Submarine Telegraphy", *Electrician*(London), Vol.38, 1897, pp.545—579.

论上推导出来的首要结论之一是，电全然没有速度。正如流过一根杆的热流的时间仅仅取决于杆一样，电流从始端到另一端的时间也仅仅取决于电缆——即取决于它的电阻量和静电容的乘积。这时候的著名工程师的观点与此相反。汤姆孙还试图弄清楚的是，用一根如此长的电缆，使电流在大西洋电缆的一端达到稳定状态需要如此长的时间，以致如果人们一旦要电缆“回报”，他们必定不会专等电流，而一定是从电流增长的开始就一道送出通信。因此，他得到的另一个重要的结论是，信号的推迟比例于长度的平方。汤姆孙估计了设计中的电缆的可能速度为每分钟三个字，西门子估计为每分钟一个字，查尔斯·布赖特爵士估计为每分钟10或12个字。普通的记录仪器是每分钟1.8个字。在1858年8月5日，英国和美国第一次电缆通信。美国总统发出了包含有祈祷词的通信："苍天保佑，愿电报成为同种民族间的永久和平和友谊的纽带。" 150个字母用30小时发完。随着时间的流逝，信号变得越来越弱，并在一个月后大西洋电缆停止通话。威廉·汤姆孙计算了在1866年铺设成功的新的大西洋电缆的最好的比例。他设计了用于发射信号的仪器。无定向的反射电流计是由高斯和韦伯最初设计的镜面电流计中作了许多改进而成的，它被用于哥丁根的电报线上。汤姆孙的电流计使电缆电报的速度从每分钟2到3个字提高到每分钟22或25个字。由于使用镜面电流计跟随光点的运动会引起眼睛的过度疲劳，因而这种电流计在电缆通信中被抛弃了。人们采用了汤姆孙的“虹吸收录器”。汤姆孙的研究由C·F·伐莱继续进行，这些研究表明，在短时间内发送一个正电流然后发送一个负电流还能使速度进一步增加。

电话机的发明

理论上最早的电话机是在1854年巴黎出版的迪·蒙瑟尔的《事实的陈述和应用》一书中记载的，当时法国的电报学家布尔

瑟尔曾考虑过从电发送声音的计划。这位作者说："假定一个人靠近一个足够灵活的不会失去任何声音振动的可动圆盘讲话，而这个圆盘交替地接通和断开来自电池的电流，那末，你可以在一定距离处有另一个会同时作同样振动的圆盘。"就实用的目标而言，布尔瑟尔没有实现他的理想。 281

休斯讲了电话机史上的第二步，他说："我受到（俄罗斯）亚历山大皇帝二世陛下的邀请，给陛下、皇后和在扎尔斯科伊·泽洛（Czarskoi Zelo）的宫庭授课，我讲了课；可是，我愿将不但是我自己的电报机装置、而且所有最新的珍品都送给陛下，美因河畔法兰克福城弗里德里克村（Friedericksdorf）的菲利普·赖斯教授把他的新电话机寄到俄罗斯，我用这个电话机能够完美地发出和接收所有的音乐，并且还能说几个词——虽然这些词有点不清楚，有时候能清楚地听见一个词，然后由于某种尚未明白原因，一个词也不能听清了。这个新奇的装置是以真正的电话理论为根据的。……它的不幸的发明者死于1874年，几乎没人知道他，他穷困并被忽视；但是德国政府自那以后试图以承认他的优先权来作出补偿，并在他的弗里德里克村墓地上树立起他的纪念碑。"[1] 赖斯的实验是在1861年作的。

电话机被忽略了15年，然后在1876年贝尔（1847—1922）发明了他的惊人的电话机，它作为"接收机"一直用到现在。它的不完备形式、第一次于1876年展出在费城的百周纪念展览上。贝尔出生在苏格兰的爱丁堡，于1872年迁居美国。1878年麦克斯韦在剑桥讲演中说到，当贝尔的发明新闻传到英国时，他期待这个新仪器在精巧性方面胜过虹吸收录器，而复杂性要大大地胜过普通的拉铃。但是，当这个仪器出现时，"好象它是由这样一些部件组成的，这些部件的每一个都是我们熟悉的，而且能被一个业余

---

〔1〕 *Electrician* (London), Vol.34, p.637.也见S.P.Thompson, *Philipp Reis*, London, 1883.

282 爱好者装配在一起，他的简陋的仪器使人失望，只是因为发现它真正能够通话才部分地解除了失望。"[1]

说来奇怪，恰恰是贝尔取得他的电话机专利的同一天（1876年2月14日），E·格雷以类似的一种仪器而取得了专利。后来一家公司买了这两个发明者的专利。

虽然贝尔的电话机作为一个"接收器"看来是完美的，但作为一个"送话器"是有缺陷的。改进这个缺陷的第一步是爱迪生发明了碳精送话器和休斯发明了传声器。爱迪生的发明是在1877年完成的，它是跟碳扣靠近的振动片组成的。在较新的电话机上应用的送话筒，诸如布莱克（Blake）、伯林纳（Berliner）、亨宁斯（Hunnings）的送话器，都是建筑在爱迪生送话器中包含的松散的接触原理之上。[2]

休斯的传声器在原理上和爱迪生的送话器相同，但是它的安装和作用是十分不同的。在1865年休斯在赖斯的电话机上作过实验。在听到贝尔的成功时，他重新开始了他的研究并制成了传声器。在1878年他第一次在他的家中向他的朋友们展出，这些朋友包括赫胥黎、洛克耶和普里斯等人。这种新设备具有最原始的特性，"谐振器是由一个孩子用的半个便士的木制存钱箱组成的，用封蜡把一个短玻璃管装在谐振器上，玻璃管内装满锡和锌的混合物，其两端用两片系着导线的木炭堵塞，在电路上有一个由三个小丹聂尔电池——由三个小果酱瓶组成——构成的电池组。导线牵引到放在毗邻房间的贝尔电话机上。一端打开的存钱盒用作话筒或送话器，而贝尔电话机用作接收器。耳朵几乎听不见声

[1] *Nature*, Vol.18, p.160.

[2] 参阅 W.H.Preece, *The Telephone*. 在 Thomas Gray 的文章中"The Inventors of Telegraph and Telephone"，读者会找到许多资料，*Smithsonian Report*, 1892, pp.639—657.

音……，通过贝尔电话机以可惊的声响传送过来……。”〔1〕 283

声　学

振动和波的实验研究

在十八世纪声学主要是由音乐家和数学家研究的；在十九世纪声学成为物理学家的一个正式的研究分支。出生在维滕贝格（Wittenberg）的克拉尼（1756—1827）是“声学之父”。他的父亲培养他学法律，但在他的父亲死后他献身于科学。他通过阅读几篇声学论文，使他相信“在那里有更多的东西有待发现，因为数学物理的假定比通常在科学中的假定要贫乏得多。”欧拉和D·伯努利的数学论文导致他研究了发声金属板。为了谋生，迫使他到处奔波于艺术演奏和科学讲演。他发明了一种新乐器（euphonium）*，在他辗转于德国、法国和意大利期间，他用它进行表演。他还做过收集陨石的工作。“发明的才能、敏锐的智慧和极好的品性是他出类拔萃的特点。”〔2〕

克拉尼用实验方法研究了弦、竿和板的振动。“克拉尼图”是受到人们赞扬的，它们是以聚集在振动板的波节线上的沙子形成的。当克拉尼在1809年把它的图形展出在法国学会之前时，这个学会的成员包括拉普拉斯都感到极大的兴趣。拿破仑要他在蒂勒里斯（Tuileries）为他重做实验，并且给克拉尼6,000法朗，为使他能把他自己的著作《声学》（初版于1802年）翻译成法文。克拉尼发现了弦线或竿的纵向振动，以及把它们应用于测定 284 固体中的声速；他首先研究了竿的扭振，并测定了物体振动的绝

〔1〕 Nature, Vol.55, 1897, p.497. 关于电话交换台、“电话系统的大脑”的起源和发展可查 Electrician (London), Vol.34, 1895, p.395.

* 一种类似萨克号的低音铜管乐器——译者注.

〔2〕 Rosenberger, Ⅲ., p.125.

对速率。他通过把气体注入风琴管中，然后测定了产生的音调，从而测定了除空气以外的其它气体中的声速。一种比较声音在各种气体或在各种固体中的速度的精巧的方法是1866年孔脱发明的。“孔脱法”已被普遍地采用于初等教育之中。

我们把声学上的一个象在光学上一样重要的、影响深远的发现归之于托马斯·杨的《波的干涉原理》。他在1800年的一篇论文中、后来又在他的《自然哲学的讲演》中解释了它。W·韦伯和他的兄弟E·H·韦伯（1795—1878）把波动作为认真研究的课题，他们在1825年出版了他们的题为《波动论》的著作。

人们长期来认为，由凝聚和稀疏组成的声波在液体中完全不能传播，因为液体似乎是不可压缩的。水的可压缩性在1657和1667年间是佛罗伦萨的西门图科学院作出的实验课题。把水注入银质空球里，把口封闭严密，然后用锤子敲击它。水就通过金属的细孔被压出来。在表观上水是不可压缩的。波意耳认为水是弹性体，但他不能以结论性的实验来证明他的观点。1762年坎顿在皇家学会证明，水是可压缩的，但他的实验几乎没有受到人们的注意。奥斯特在1822年左右得到了更加精确的可压缩性的数值。象坎顿一样，他以盛水的容器在其内外受到同样的压力进行实验，

285 因此防止了它的容量的变化。当压力增加一个大气压时，他的结果表明，原来的体积减少了百万分之四十七。1827年日内瓦的力学教授科莱顿和日内瓦的施特姆（1803—1855）得到了稍大一点的数值——百万分之五十一点三。施特姆在1830年以后是巴黎的数学教授。这两个合作者还测定了水中的声速。这些实验是在日内瓦湖的托农岛(Thonon)和罗勒岛(Rolle)之间做的，其间距为13,487米。在一个测量站把一个铃放到水下，并用锤子敲响它，在另一个测量站把一个特制的耳状喇叭浸到水中。他们发现，这速度是每秒1435米。巴黎的教师、后来是法兰西学院物理陈列馆的管理员沙伐特（1791—1841）在1826年证明，声波在水中的传播方式和在固体中一样。拉图尔成功地用汽笛使水发生声振。拉图

尔把这种能在水中引起可闻声的仪器称之为“汽笛”。为了计算振动数他大大地改进了汽笛和它的机构。沙伐特用这个仪器和其它装置测定了可闻度的极限。他能听见每秒振动24,000或48,000次的物体发生的音调，他把振动数的下限放在每秒14或16次。

赫尔姆霍茨的和声理论

赫尔姆霍茨创造了声学史上的一个新纪元，他在1863年出版了他的《论音的感觉》第一版。1870年的德文第三版由A·J·埃利斯在1875年译成英文。从那时以后，就出版了新的德文和英文版。赫尔姆霍茨认为，乐音是由于空气的周期运动引起的；他以音强、音调和音质区分乐音。他认为，声学上的音质是由“上分音”决定的，丁铎尔把它称之为“泛音”。几乎所有的乐音都具有这些泛音，泛音数及其相对强度决定了音质。欧姆首先指出，只 286 有一种振动会产生不和谐的上分音。而且仅仅由基音组成，即摆和调音叉特有的振动形式。赫尔姆霍茨做了表明元音质的直接组成部分的实验，这些成份“本质上不同于其它大多数乐器的音，事实上，乐器的分音响度不单取决于它们的序数，而且绝大部分取决于那些分音的绝对音调。”“如果只有奇数分音存在（象在狭窄音中堵住的风琴管，在中点上弹拨的钢琴弦以及单簧管），音质是空的，当大量的这样的上分音出现时，音质是鼻音。当基音起主要作用时，音质是嘹亮的；但基音在强度上不足以压倒上分音时，音质是不佳的。”[1]赫尔姆霍茨设计了球形谐振器，他以这种仪器分析了人的声音和一般乐音。他还以电磁仪器调音叉的合成音，成功地产生了人工的元音，它们准确地模仿了人音的元音。以同样的方法他模仿了风琴管的音质，纵使“在这些模仿中由拍击管唇的空气流所形成的嘘音是不够的。”

---

〔1〕 Helmholtz, *Sensation of Tone*, trans. by Ellis, London, 1885, pp. 118, 119.

"拍"的研究导致赫尔姆霍茨得到新的和声理论。毕达哥拉斯已经发现，把一根弦线分为两个长度的比例愈简单，由弦线的这样一些两个部分所产生的声音的谐和就更加圆满。后来的研究家们证明，弦线以这种方式作用是因为它们的长度和它们的振动率的相互关系。为什么纯音会给人愉快的感觉，这仍然是一个谜，尽
287 管后来欧拉宣称，人类灵魂要在简单计算中取得性格上的爱好。赫尔姆霍茨以他制造的昂贵的复音汽笛进行了关于拍的实验。在两个单音的情况下，在单位时间内的拍数等于振动率之差。如果拍数是每秒33次，则这种不协和音是难于忍受的；如果拍数小于或大于这个数，则效果稍好些；如果拍数超过了每秒132次，则完全没有不愉快的感觉。如果每一种声音都有它的泛音，那么谐和或不谐和的问题就更复杂。出自于基音和泛音之间的拍，或出自于泛音本身之间的拍，应当予以考虑。据发现，在一般情况下，随着两个乐音的音调之差变化到使拍的干扰作用越来越明显，那么表示这两个基音的振动比的数字也越来越大。这样一来，赫尔姆霍茨的理论就解释了为什么音乐中较简单的比例更加令人愉快。

赫尔姆霍茨的和声理论遇到了许多音乐家和哲学家的批评，但是这些抨击并不成功，反对它的声音已经消失了。

当两个单乐音一齐发出时，就产生两种声学现象：(1) 上面讨论过的拍；(2) 结合音。后者有两类：和音和差音。赫尔姆霍茨发现了和音；差音是由德国的风琴家索尔格在1744年发现的，并且又被意大利著名小提琴家塔尔蒂尼发现。设两个单音各为每秒振动m和n次，因此差音的振动率是m－n，和音的振动率是m＋n。要产生差音就必须有相当强的原音。赫尔姆霍茨为此用了汽笛。和音更难以观察。它们是被赫尔姆霍茨预言和发现的。巴黎的闻名的声学仪器制造者孔尼（1832—1901）的观点在某些
288 方面是和这个伟大的德国研究者的观点相反。孔尼认为，当和音形成快拍时会产生新的音。这个理论并不新鲜：拉格朗日和托马斯·杨曾经有过这种观念，但被赫尔姆霍茨拒绝了。孔尼藉助他

自己制造的大调音叉，尽力想证明他的观点的正确性。孔尼没有把握的是，他是否能以他的调谐叉检测和音与差音，但他断言，他听到了以$m-vn$和$(v+1)n-m$表示振动率的音，这里$m>n$，v是整数，结果是vn和$(v+1)n$是紧邻较高音的那些较低音的谐和泛音的振动率。佛克脱(1850—1919)[1]在1890年断定，赫尔姆霍茨的和音与孔尼的拍音二者在理论上都是成立的，并且根据情况的不同，这种音或者由这种音系占优势或者由那种音系占优势。如果两种振动的能量接近相等，则组合音更突出，否则就会更容易听到拍音。

孔尼改进了E·L·斯科特在1859年的发明，提出了闻名的用以分析声音的感压焰仪器。爱迪生在1877年首先描述的留声机曾被发现可为同样的目的服务。

巴黎圣路易学院的教授里萨儒（1822—1880）在1855年设计了很精巧的方法以研究各种振动的成分。给两个振动着的物体（例如音叉）配备小小的几个镜子。一束光线从一个镜面反射到另一个镜面，然后再反射到屏上。通常物体是这样放置的，以致它们的振动面彼此垂直。于是由光点在屏上描绘的曲线就是闻名的“里萨儒图”。可是，很早以前在美国马萨诸塞的塞勒姆 289 (Salem)地方的鲍狄奇就已经发现了这些现象。1815年，弗蒙特(Vermont)伯林顿(Burlington)城的迪安教授发表了一篇研究报告，论述“从月球上看地球的运动”，并设计了用作示例的复摆，人们认为，29年以后，这个复摆被布莱克本推广到科学中。这篇论文促使鲍狄奇审查挂在两点上的一个摆子的运动理论，并为验证他的理论做了几个实验。他画出了和里萨儒曲线相同的图。[2]

---

[1] *Wiedemann's Annalen*, N.F., Vol.40, pp.652—660.

[2] 参阅 J.Lovering, "Anticipation of the Lissajous Curves," *Proc.of the Am.Acad.N.S.*, Vol. 8, pp. 292—298; Dean 和 Bowditch 的论文见 *Memoirs of Am. Acad. of Arts and Science*, 1st Series, Vol.Ⅲ., 1815, pp.241, 413.

290

二 十 世 纪

二十世纪的前二十五年可恰当地称为奠基时代，在这个时代里甚至于物理学和化学的基础本身都受到了反复的审查和扩展。物质结构、化学元素嬗变的可能性以及力学的基本定律都受到了重新的审查。

放 射 现 象

在实验物理学方面象放射现象一样引起人们广泛和普遍的注意、并导致基础理论的深刻改造的这样的题目是不多的。在医疗和外科手术的实践中放射性已得到了广泛的应用；它还部分地实现了中世纪炼金术士的梦想。

亨利·贝克勒尔和放射现象

我们已经讲过，伦琴（1845—1923）在1895年发现了X射线（第271页），巴黎的亨利·贝克勒尔（1852—1908）发现了放射现象（第272页）。正在研究磷光现象的贝克勒尔确定了铀盐不仅在曝光后、而且在暗处放置了几个月之后都能发出辐射。他发现，这种辐射能使照相底片感光，并能使有一定距离的带电体放体——这些性质为研究这些新射线提供了两种方法。

居里夫人、钋、镭

后来成为居里夫人的玛丽·斯克罗多夫斯卡[1]，于1867年出生于华沙，她的父亲是华沙一个学园（lyceums）的物理学和数学教授。她在私立学校里学会了法语、德语、俄语和英语，在17岁时成为家庭女教师，但在晚上仍继续她的学习。1891年她动身去巴黎，她的大姐已在那里学医。她住在一间顶楼里，在索尔本（Sorbonne）大学专心攻读物理学课程，这需要极大的努力，一部分原因是她的数学基础还不够。1893年，她以第一名考取“物理学硕士”学位；1894年又以第二名考取“数学硕士”学位。于是她接着在索尔本的一个物理实验室里开始了实验研究，准备博士论文。她在这里遇上了皮埃尔·居里（1859—1906），他刚刚当上巴黎物理化学学院教授；他们于1895年结婚。她开始同他一起在那所学院的实验室进行研究工作。1897年她完成了钢的磁性的研究。此时她和她的丈夫受到亨利·贝克勒尔发现铀的激励。居里夫人决心进一步从事于这个课题的研究。她发现钍（第272页）的性质和铀一样。她用静电计进行研究就像化学家用分光镜进行研究一样，她又观测到某些矿物显示的放射性比其中所含有的铀和钍所具有的放射性要大得多，这表明有某种未知的放射性很强的物质存在。1898年7月[2]，通过皮埃尔·居里、居里夫人和G·布勒蒙的通力合作，他们终于能够宣布存在有一种新元素，他们称之为钋[3]——以纪念居里夫人的祖国。钋是从沥青铀矿〔即在波希米亚的圣·约阿西姆斯塔尔(St.Joachimsthal)

---

〔1〕 *Marie Curie, Pierre Curie*, trans. by Charlotte and Vernon Kellogg. New York, 1923, “Autobiographical Notes”, pp.155—242.

〔2〕 *Comptes Rendus*, Vol.127, 1898, pp.12, 15.

〔3〕 *Comptes Rendus*, Vol.127. 1898, p.175.

地方的黑色发光的含铀矿〕中和铋的化合物中一齐找到的。而他们在研究钋时发现不仅从沥青铀矿中提炼出的铋的化合物有放射292 性，而且同样从沥青铀矿中提炼出的钡的化合物也有放射性。再者，他们发现，普通的钡的化合物完全没有放射性的，因此他们在从沥青铀矿的提取物中观察到的放射现象一定是由于一些新物质产生的。1898年12月，他们终于能够宣告他们分离出了他们称为"镭"的这种新物质的盐，并证明它比钋重要得多。但是，钋和镭都是化学元素的问题既未得到证实也未得到普遍承认。[1] 尚待做的最困难的一部分研究是测定镭的原子量和它的其他性质，以及分离出纯元素的镭。这需要几年的连续工作和英雄般的奋发努力。居里夫妇没有适当的试验室，没有经费和实验助手。他们听说在圣·约阿西姆斯塔尔的铀厂是这样处理沥青铀矿的，以致镭仍留在丢弃的矿渣中。由于拥有这个厂的奥地利政府的允许，他们得到几袋这种矿渣——"跟松叶相混杂的褐色的粉末"。后来他们又弄到了几吨这种矿渣。他们在巴黎物理学院附近的一间被遗弃的屋棚里处理这些物质，这间小屋棚曾经是医疗解剖室。屋顶有漏洞，并且没有预防夏天的酷暑和冬天的寒冷的适当设备。然而居里夫妇坚持工作，他们终于在1902年炼出了十分之一克的纯氯化镭；他们研究了它的特征光谱，并且宣告了首次测定它的原子量为225。

1900年皮埃尔·居里在索尔本大学当了助理教授，居里夫人在靠近巴黎的塞夫勒（Sèvres）女子高等师范学校当教授。她在1903年完成了她的博士论文。那年的诺贝尔奖金共同授与亨利·贝克勒尔，居里和居里夫人。1906年皮埃尔·居里在巴黎街道上293 被载货马车撞死。抚养和教育两个幼女的任务就落到居里夫人一个人身上。她继任了她丈夫在索尔本大学的职务。1907年安德鲁·卡内基提供了研究基金。她制备了十分之几克的纯氯化镭，新测定的原子量为226.2，并在1910年分离出纯的金属镭。第二

[1] *Nature*, Vol.62, 1900, p.152.

年她得到了诺贝尔奖金，虽然身负疾病，但她仍到斯德哥尔摩去受奖。镭盐在医疗和工业上的应用有必要有一个量度镭量的标准。她制备了一种标准，它由一个装有21毫克氯化镭的几厘米长的玻璃管所组成，这个标准保存在塞夫勒的国际度量衡局内。她在巴黎为正在创办的镭学研究院的实验室的设计而积极地工作着。〔第一次〕世界大战期间，居里夫人以射线治疗服务积极参加救护工作。1921年她到美国接受美国妇女赠送的一克镭，这是从科罗拉多(Colorado)的500吨的钒酸钾铀矿中提取出来的。这镭在巴黎的镭学研究院里使用，她是这个研究院的院长，她的女儿伊琳是这里的研究工作者和教师。

锕、锾

1900年，A·德比尔纳发现了沥青铀矿中的第三种放射性物质，F·O·吉塞尔也独立地发现了它。耶鲁大学的博耳特伍德(1870—1927)消除了关于它们是否相同的疑问，他把德比尔纳的物质分成两种元素：一种命名为吉塞尔的物质，现在称为“锕”，另一种新元素命名为“锾”。

镭盐的提供

镭的非常强放射性引起了轰动，但是实验首先被获得镭盐的困难所限制。在1900年左右，在F·O·吉塞尔的指导下，与沃尔芬比特尔(Wolfenbüttel)大学预科的两个人J·爱耳斯特(1854— 294
1920)和H·盖泰尔(1855—1923)合作，在汉诺威附近的利斯特(List)的E·德·哈恩公司(firm of E·de Haën)承担了备制少量含镭的放射性钡盐的工作，并把较廉价的放射性副产物投入市场。[1]

---

〔1〕 *Nature*, Vol.62, 1900, p.152.

在这之前，法国的化学产品中心协会在德比尔纳的指导下筹备含镭的钡盐的销售事业。[1]

对能量守恒原理的攻击

很早就给科学家以深刻印象的氯化镭或溴化镭的一种特性是，它们能够放出辐射而本身没有一点明显的物理和化学的变化。起初人们把这现象归之于涉及的能量实在太小。[2]但是对辐射能量的更加精确的量度使得这个解释站不住的了。蒙特利尔市的麦吉尔大学的E·卢瑟福和R·K·麦克克朗在1900年发现，一克氧化铀每秒钟放射出10^{-11}卡的热量，而镭的放射性要比铀强100,000倍以上。[3]其他人关于镭的放射性的估计得到了还要高的数值。每小时镭放射的热足以使和它同重的水的温度从冰点升高到沸点，然而根据早期的一些观测，这稳定的能流丝毫不显出减弱的迹象。象阿拉廷(Aladdin)的神灯一样*，看来镭在放出射线和热的同时，明显地向自然界的普遍定律即能量守恒原理挑战。[4]G·勒邦说："如果能量守恒原理——顺便说说，它仅仅是在非常简单的情况下所做的一些实验的大胆的概括——也屈从于正在打击它的一些冲击，那么人们肯定会作出这样的结论：世界上没有什么东西是永恒的。这个伟大的科学神威也将被宣告为顺从那个统治万物的不变的循环——出生，成长，衰老和死亡。"[5]

295

〔1〕 E.Rutherford, *Radioactive Substances*, 1913, p.17.

〔2〕 *Nature*, Vol.61, 1900, p.547.

〔3〕 *Nature*, Vol.63, 1900, p.51.

〔4〕 Nature, Vol.62, 1900, p.154.

〔5〕 Gustave Le Bon, Evolution of Matter, 由F.Legge译成英文, London, 1907, p.18.

* 阿拉廷是《天方夜谭》中的人物，这里的"神灯"即《天方夜谭》中的如意灯，它比喻能满足人的一切愿望的东西。——译者注.

拥护能量守恒原理的人们寻求别的解释。为此，W·克鲁克斯[1]提出设想，铀和钍的化合物从周围气体分子中吸收了能量并且把它转变成为辐射能。居里夫人[2]认为，世界上充满了甚至比X射线的贯穿力还要大的射线，这些射线只能被象铀和钍那样重原子量的物质所吸收。E·爱耳斯特和H·盖泰尔[3]反对这两种假设并在以后作出了恰当的建议[4]："放射性物质的原子以分子内部放出能量的方式放出能量并从一种不稳定的结合转变为稳定的状态。"卢瑟福和索迪[5]在他们的关于原子蜕变的基本论文中发展了同样的观念。他们在1902和1903年以实验证明镭当它辐射能量时确实在发生变化，确实经受了转化。他们的观点是：镭原子在变化，原子内部的能量转化为原子外部的运动能量。这样，能量守恒定律在一场猛烈的风暴中幸存下来了，可是这场风暴却根绝了十九世纪的一些别的科学观念。用克鲁克斯的话说："十分之几克的镭就败坏了化学中的原子论，革新了物理学的基础，复活了炼金术士的观念，给某些趾高气扬的化学家以沉重的打击。"[6]

镭的光谱

296

我们稍微更加仔细地追溯一些事件的经过就会发现，E·德马尔赛(1852—1904)从居里夫人提供的矿石样品中做了关于镭的光谱的最早的测定。他发现在不纯的氯化镭的光谱中除了钡、铅、钙和铂的谱线以外，还有一条明亮的新谱线，波长 $\lambda = 3814.7$Å，

---

〔1〕 Nature, Vol.58, 1898, p.438.

〔2〕 Comptes Rendus, Vol.126, 1898, p.1101.

〔3〕 Wiedmann's Annalen, Vol.66, 1898, p.735.

〔4〕 Wiedmann's Annalen, Vol.69, 1899, pp.83, 88.

〔5〕 *Phil.Mag.*, 6.S., Vol.4, 1902, pp.376, 569.

〔6〕 E·E·F·D'Albe, *Life of Sir William Crookes*, 1924, p.286.

在他看来，这条谱线证实了一种新元素的存在。[1]

由放射性引起的电离

铀、钍和镭的辐射受到了各个不同的实验家的极大注意，并且起初得到了一些相互矛盾的结论。[2]1899年卢瑟福得到了重要的结论：铀所产生的气体导电性是由于电离现象的结果，按照J·J·汤姆孙的实验，这跟由X射线所引起的电离现象是一样的。

镭的辐射特性

1899年几个观测家同时做了另一种重要的观测，即一些放射性物体的某些辐射会被磁场所偏转。这是被F·O·吉塞尔，也被圣·迈耶尔和E·U·薛魏德莱尔，以及贝克勒尔和皮埃尔·居里所观察到。镭制品放出的某些射线被磁场偏转的情况类似于真空管中的阴极射线。皮埃尔·居里发现镭的射线有两种：一种外观上不能被磁场所偏转（现在称之为α射线），另一种射线能被偏转并具有较大的贯穿本领（现在称之为β射线）。把这种辐射的某些射线等同于阴极射线需要有两方面的证明：皮埃尔·居里和居里夫人做的一种证明是，有电荷的传输；亨利·贝克勒尔做的另一种证明是，在静电场中有偏转。[3]卢瑟福重复了这些实验的结果 297 是，使用最强的磁铁最后发现了α射线的微小偏转，但是与β射线的方向相反。用电的方法也表明了这一点，并且贝克勒尔用照相的方法证实了这个结果。[4]

---

〔1〕 *Comptes Rundes*, Vol.127, 1898, p.1218; Vol.129, 1899, p.716; Vol.131, 1900, p.258.

〔2〕 *Nature*, Vol.62, 1900, p.153.

〔3〕 H.Becquerel. *Nature*, Vol.63, 1901, p.398.

〔4〕 *Phil.Mag.*, S.6, Vol.5, 1903, p.481.

镭射线的第三种类型（现在称之为γ射线）是被P·维拉德[1]用照相方法发现的，并且已经证明它比真空管中产生的穿透本领最强的X射线有更大的穿透本领，这些γ射线不被磁场所偏转。

射　气

1900年卢瑟福研究了来自钍化合物的一种神秘的"射气"，并发现它能使邻近的气体电离，发现它的放射力保持了几分钟并逐渐地消失。这种射气只是钍的蒸汽吗？[2]在他那时拥有的镭的不纯样品中都不放出射气。在1901年居里夫人和A·德比尔纳把镭放进排除了空气的球形容器中，这样从镭中得到了放射性的气体物质。由于球形容器中释放具有强放射性的气体物质，因此真空度不断地减低。卢瑟福后来用从靠近汉诺威的利斯特的哈恩公司那里来的镭样品发现，将镭加热，镭的射气量增加到平常温度下的数量的一万倍。这些射气是大小和分子相仿的放射性物质的蒸汽吗？或放射性气体或放射的微粒吗？卢瑟福在1901年考察了镭射气进入空气中的扩散率，并且发现它比镭的蒸汽可能有的扩散率要快得多，因为镭的原子量重。由此他断定气体物质不是镭的蒸汽。[3]后来卢瑟福和索迪发现钍的射气的行为就象惰性气体一样。[4]

1902年卢瑟福和索迪发现了引起明显的化学变化的新型物质；从钍已经分离出了他们称为钍X的放射性物质，在一段时间后，当钍X慢慢地消失时，钍也恢复了它的放射性。[5]索迪从不

298

[1] P.Villard, *Comptes Rendus*, Vol.130, 1900, pp.1010, 1178.

[2] E.Rutherford, *Phil.Mag.*, Vol.49.1900, p.1; *Nature*, Vol.62, 1900, p.154.

[3] E.Rutherford *Nature*, Vol.64, 1901, pp.157, 158.

[4] *Phil.Mag.*, S.6, Vol.5, 1903, pp.484, 485.

[5] *Nature*, Vol.66, 1902, p.119.

放出α射线而仅仅放出β射线的铀中得到了铀X。正如前面讲过的一样，在1902年秋卢瑟福和索迪提出了这个观点：元素的放射性是亚原子化学变化的表现，并且辐射伴随着这种亚原子化学变化。[1]

从镭得到氦

拉姆塞和索迪发表的实验似乎指明镭分解为氦。[2]这个结论引起了“一片惊呼声”。我们还记得，氦是由P·J·C·詹森(1824—1907)和N·洛克耶(1836—1920)在太阳中发现的。洛克耶把它命名为“氦”。1895年W·拉姆赛爵士(1852—1916)和洛克耶在富钇复铀矿(mineral cleveite)放出的气体中发现了氦。在含铀的矿物中几乎一定有氦存在的事实导致卢瑟福和索迪提出“有可能氦是一种放射性元素蜕变的最终产物。”[3]关于氦的不确定性被拉姆赛和索迪在1903年7月完成的实验排除了。[4]溴化镭的射气被装进光谱管中。起初用光谱检验并没有氦，但在四天以后，氦的特征光谱线出现了。这样，氦是由镭射气的转化产生的。

299 在1903年秋，卢瑟福[5]把他和索迪的假说送给英国协会，我们已经讲过了这个假说，即放射性物质的原子的分裂和这种蜕变是放射性的原因。放射性物质的电中性原子抛出构成α辐射的带正电的物体，原子中剩下的东西构成射气。这射气又抛出带正电的物体，这过程一直重复到带正电的物体被耗尽并且物质不再具有放射性为止。据人们估计镭原子的能量储藏是巨大的，一

[1] *Phil.Mag.*, S. 6, Vol. 5, 1803, p.485.

[2] Ramsay and Soddy, *Nature*, Vol.68, 1903, p.246.

[3] Rutherford and Soddy, *Phil.Mag.*, S. 6, Vol. 5, 1903, p. 453; Vol. 4, 1902, p.582.

[4] *Nature*. Vol.68, 1903, p.355.

[5] 同上，p.610.

克镭不少于10^{8}尔格。O·洛奇和J·拉莫尔赞同地看待这个假说。开尔芬勋爵根据他的原子概念在一封信中提出了另一种理论，[1]按照这理论，"大量的辐射能来自原子外部，至于它在那里的存在形式我们尚未找到发现它的方法。"一年以后开尔芬反复讲到：如果镭的很高的热发射率"能够月以继月地持续下去，能量肯定是以某种方式从外部供给的。"[2]1904年他分别地描绘了释放α射线和β射线的镭原子的模型。[3]

在1903年最后确定了以"α射线"、"β射线"、"γ射线"的名称来命名的镭的辐射。1904年E·卢瑟福的书《放射性》第一版出版[4]，这本书包括了到那时为止已得到的各种成果的全面的总结。这本书提出了这个假说：镭放出热是由于镭原子自发地蜕变为具有较少能量的物质；这过程显然是不可逆的。α粒子是带正电的并认为它有两倍于氢原子的质量。剩余的镭原子构成了镭X。镭X又蜕变成α粒子和气体状的射气。射气又发生蜕变，如此等等。最后的产物可能是钋。因此，一个镭原子看来是由一个钋原子和约六个α粒子所组成。但是也有理由认为α粒子变成为氦原子。因此，卢瑟福在那时论证镭原子似乎确实是钋和氦的化合物，它是一个分子，而不是一个基本原子。可是，不依赖于温度的放射性过程的速度似乎表明变化是纯属原子的。卢瑟福为镭本身是由铀变化来的猜想提出了论据。他估计了镭原子的平均寿命不少于1500年。

300

开尔芬反对蜕变理论

一个引人注目的事件是在1906年8月期间在伦敦《泰晤士报》

---

〔1〕 *Nature*, Vol.68, 1903, p.611.

〔2〕 *Nature*, Vol.70, 1904, p.107.

〔3〕 *Nature*, Vol.70, 1904, p.516.

〔4〕 *Nature*, Vol.70, 1904, p.241.

上关于镭的争论。开尔芬勋爵在英国协会的会议以后立接发起了公开挑战，在这个会议上索迪讨论了元素的演化，并且讲到：铀逐渐地变为镭，镭变为它的射气和几个其他的相继产物，一直到十之八九转变为铅；铅依次逐渐地蜕变成银。[1]开尔芬几乎是单独地对用来解释镭的特性的嬗变和演化学说发动了他的征战。他争辩道：由镭产生氦来证明嬗变并不比在富钇复铀矿中发现氦来证明嬗变更有力些。而假定在镭和富钇复铀矿中都含有氦，这就完全足够了。开尔芬否定有实验证据可以证明太阳的热是由于镭的缘故，他把这个热归之于引力。参加这场论战的人当中有O·洛奇，H·E·阿姆斯特朗，R·J·斯特劳特和A·S·伊夫。[2]开尔芬引证卢瑟福把镭看作化合物的说法并且提出镭可能是由一个铅原子和四个氦原子组成的。索迪又引用卢瑟福的话，只要有一个不跟蜕变理论一致的实验事实被确立下来，就立即放弃它。开尔芬在1907年8月英国协会上对嬗变理论又发起了论战。他认为，许多化学元素的所有不同的化学的和其他的性质能仅仅用完全相同和类似的初始原子在组合上的差别来解释是很少可能的。在同一个会议上，卢瑟福表示的意见是，电子已经变成关键，虽然在那时不可能决定的是，电子在放射现象中释放的、或者是由原子的光学性质所揭示的、是否仅是原子的外部壳层还是原子内核的内部结构的一种显示。

301

开尔芬的死[3]

几个月以后，在1907年12月17日，开尔芬勋爵离开了人间，终年83岁。他的死是由于他在他的乡间宅第走廊作实验时着凉所致。开尔芬勋爵（威廉·汤姆孙）于1824年出生于爱尔兰的贝尔

〔1〕 *Nature*, Vol.74, 1906, p.453.

〔2〕 *Nature*, Vol.74, 1906, pp.516—518. 包括对争论的说明。

〔3〕 S.P.Thompson, *Life of William Thomson*, London, 1910.

发斯特(Belfast)，但他是苏格兰人的后裔。他和他的兄弟詹姆斯·汤姆孙曾在格拉斯哥学习，他从那里进入剑桥，并于1845年以第二名甲等数学优等生毕业于剑桥大学。麦克斯韦尔和J·J·汤姆孙都是在剑桥数学甲等优等生竞赛性考试中名列第二的两位第一流的物理学家。威廉·汤姆孙在22岁时当上了格拉斯哥大学的自然哲学教授，一直任职到死时为止。由于他的卓越的数学和物理学成就，他在1866年被授以爵士位，亦在1892年被封为开尔芬勋爵。他受到J·傅里叶（1768—1830）和其他法国数学家的数学物理学的极大影响。正是傅里叶的关于通过固体的热流的数学导 302 致他处理了通过导线的电流的扩散问题，并使他解决了通过大西洋的海底电缆（第280页）发送信号时所遇到的困难。关于他对实验室指导的热诚，我们在讲到物理实验室的发展时再来讲它。

镭的相继转化

在1908年1月31日，卢瑟福描述了放射性过程[1]并且证实了由他自己和索迪早在五年以前提出的蜕变理论。卢瑟福说："在追寻发生在各种放射性物质转化的显著的相继性方面已做了大量的工作……现在已经知道不稳定物体的一张大清单……。对镭射气转化的分析得到了很重要的和有意义的结果。在经过短周期的镭A、B和C三个阶段以后，一种长周期的物质镭D出现了。这物质又通过短周期的〔镭〕E，F两阶段转化成为周期为140天的镭G。圣迈耶尔和薛魏德莱尔最后证明，镭D是由K·A·霍夫曼分离出来的放射性物质的基本成分，并被他称为镭铅。镭G和居里夫人从沥青铀矿中分离出来的第一种放射性物质钋相同。因此我们肯定，这些物体都是镭的转化产物……。我补充另一种产物，它在镭D和钋之间，周期为4.5天。迈耶尔和薛魏德莱尔证明了

〔1〕 *Nature*, Vol.77.1908, p.422.

这样一种产物的存在。我们现在也知道钍的〔转化〕产物的非常长的清单。”

镭　母

卢瑟福这样描述探索直接产生镭的物质的研究："探索这个无从捉摸的镭母曾经几乎是一种有巨大意义的工作，并且说明了作为实验家的指南的理论的极大重要性……。看来最可能的镭母是铀，其转化周期的数量级为10亿年。如果这是事实，那么起初排除了镭的铀，应当随着时间的进程产生镭，也就是，镭应当又出现在铀中。这是被索迪和博尔特伍德分别独立地验证过的，并且这两人都证明……镭在几年的时间内不会有可观的增加，……可是，有另一种间接的但非常简单的开始解决镭的由来的方法。如果镭是从铀的转化而来的……，那末在古老的矿物中镭和铀的含量之比应当是一个确定的常数。假如镭的数量要达到它的平衡值就需要经历足够的时间，这显然是事实。这个比率的恒定性完全被博尔特伍德，R·J·斯特劳特和H·N麦克科伊独立的工作所证实。已经证明，对应于一克铀的镭量是3.8×10^{-7}克。”居于铀和镭之间的称为锕的物质是博尔特伍德在1906年用实验发现的；[1]但是卢瑟福指出，锕本身不对镭的增长负责，而是另一种与锕不同的物质。博尔特伍德证实了这个结果，他从铀矿中分离出一种缓慢地转化成镭的新物质。他把这种物质命名为"锾"。[2]它就是长期来期待着的镭母。这样一来，转化理论的主要的预见都已在实验上证实："我们能把铀、锾、镭和它的一长列后裔联成以铀为始祖的一个大家族。”[3]

---

〔1〕 *Nature*, Vol.75, 1906, p.54.

〔2〕 *Nature*, Vol.75, 1907, p.589.

〔3〕 *Nature*, Vol.77, 1908, p.423.

克鲁克斯的工作和死亡

304

十九世纪的科学家对今后能否观测到单个原子不抱任何希望。哪能看到单个的物质原子呀！但在1903年威廉·克鲁克斯爵士[1]用他的一种仪器——他的闪烁镜，几个先令就可以买到，并且只含有极微量的溴化镭——显示镭的α粒子打在硫化锌荧光屏上所引起的瞬时闪光。这效应类似于流星雨，闪光的效应清晰地不连续，每一个α粒子的轰击都产生微弱的闪光。事实上，卢瑟福和盖革实际数出了一定量的镭每秒钟发射的α粒子数。[2]

克鲁克斯关于镭的研究是他漫长生涯中最后的重要的科学工作。他死于1919年。他于1832年出生在伦敦[3]，是一个裁缝的儿子。他只受了很少的正规的学校教育。当他是一个孩子的时候，他就办起了一种实验室，并且总是在尝试着作实验和阅读他所能找到的任何科学书籍。他没有受过大学教育，也没有当过教授。从1870年起他开始从事四年关于神灵现象的研究。他关于"辐射物质"的研究，他的辐射计和"克鲁克斯管"在本书257页和258页上已经叙述过了。他的"辐射物质"类似于β射线。他是元素铊的发现者。

α粒子的射程

在研究原子结构方面α粒子的散射是很重要的。威廉·亨利·布喇格(在1886—1908年他是南澳大利亚的阿德莱德(Adelaide)

[1] C·W·Crookes, *Nature*, Vol.68, 1903, p.303.

[2] F·Soddy, *The Interpretation of Radium*, New York, 1920, p.45.

[3] E·E·F·D'Albe, *Life of Sir William Crooks*, New York, 1924.

大学教授，在1909—1915年他是利兹(Leeds)大学教授，在1915—1923年他是伦敦大学教授〕在1904年左右发现了α粒子有确定的射程；当以钋发射时这个射程是通过空气38毫米长。布喇格给出了一张清楚的α粒子飞行图片："不管每个α粒子遇到什么，它总是走直线路径；它穿过了它所遇到的所有的原子，无论这些原子是构成固体的或是构成气体的一部分……，无论在它之前有什么障碍，它都不发生偏转，除非到了非常靠近它的路径的终端，……把一块薄金属板放在粒子流的路上，因而夺去了每个粒子的一些能量，但是没有一个粒子会因为和金属原子碰撞而静止，而且α粒子流中的粒子数仍然不变。"〔1〕后来的实验证明，一些α粒子在它们通过物体时或多或少地发生了偏转。卢瑟福广泛地应用了这种散射。

305

α粒子是带电氦原子

卢瑟福证明，α粒子是由带正电荷的原子组成的；他起初把它们的质量看成氢原子的两倍，假定它们带有一个原子电荷。但是，在1908年由于α粒子计数实验的结果，显示了每个α粒子带有二个原子正电荷。卢瑟福以测定已知α粒子数的总电荷弄清了这一点。〔2〕由此α粒子的质量为4，和氦原子的质量相同。卢瑟福和T·D·罗伊兹还以直接的实验证明α粒子在失去它的电荷以后是氦原子。〔3〕

〔1〕 F·Soddy, *The Interpretation of Radium*, 4. Ed., New York, 1920, p.62. W·H·Bragg, *Phil.Mag.*, Vol.8, 1904. p.719; Vol.10, 1905, p.600, Vol.11, 1906, p.617, W·H·Bragg and R·D·Kleeman, *Phil. Mag.*, Vol.8, 1904, p.726; Vol.10, 1905. p.318.

〔2〕 Rutherford and Geiger, *Pro.Roy.Soc.*, London, Vol.81, 1908, pp.141—173.

〔3〕 Rutherford and T·Royds, *Phil.Mag.*, Vol.17, 1909, p.281.

α和β粒子的照相径迹

英国剑桥的C·T·R·威尔逊进一步研究了α粒子的路径，他成功地拍摄了α粒子的径迹。[1]当一个闭合空间里的潮湿空气突然膨胀时，它就被冷却。如果是纯净的空气，当这样冷却后， 307 让一个α粒子穿过，就会引起电离，湿气就凝聚在离子上，在适宜的光照下一些α粒子的径迹暂时能够被看见，并且也能将它们拍照，其照片就象许多条迷雾的长蜘蛛丝。威尔逊说：[2]"α粒子在它每毫米的路径上千万次地遇到空气中的气体原子，从而引起气体电离，……并且因为这些云雾粒子（它们是被水的凝聚所放大的单个离子）是如此紧密的聚集在一起，以致在照片上不能各别地看见它们。"几乎所有的α粒子的径迹都是直的，但是有极少数呈现突然的偏转。另一方面，β粒子给出弯弯曲曲的径迹。

氮核的分裂

惊人的成就是人工地打破了一种"稳定元素"。我们假定，原子的持久变化要求原子核本身分裂。原子核被假定为在所有的原子中都相同的更简单的部份的结合。1922年，卢瑟福和J·查德威克能够打开没有放射性的含有稳定原子的物质即氮气的原子核。连结这样一个稳定原子的核的各个部份的力是非常巨大的，但是它们屈从于镭发射出来的快速α粒子。结果是，氢核(质子)从氮原子核中释放出来了。这是一个有根本重要性的惊人成就。现代炼金术的时代确实到来了。对其他的许多原子也作了实验。除了氦、氖和氩以外，对原子量到40为止的所有元素都在1922年

---

〔1〕 C·T·R·Wilson, *Proc.Roy.Soc.*, London, A, Vol.87, 1912, p.277.

〔2〕 引自 Soddy，同上页注〔1〕.p.64.

作过了试验。氢粒子也成功地从硼、氟、钠、铝和磷（它们全是奇原子序数的元素）的原子中分离出来。但没有从其他元素的原子核中得到它。假定α粒子和原子核之间的作用力在原子中的空间绝大部分（只要不非常接近原子核）遵从平方反比定律，那么α粒子就可以用来量度原子核的电荷。据当时发现，质子能从一些较轻元素的原子核中放射出来，于是出现了这个问题：引起蜕变的α粒子变成了什么？1925年在卡文迪许实验室的H·H·普拉斯凯特，在卢瑟福的指导下对氮中的400,000多个α粒子的径迹进行拍照，发现了质子和反冲原子核的径迹，但是，没有发现α粒子逸出。他断定，α粒子被氮原子核俘获了，因此作为其中有一个质子被发射的碰撞的结果，氮核在质量上与其说是可能减少不如说是可能增加。[1]另一方面，W·D·哈金斯和R·W·瑞安在芝加哥大学得到了不同的实验结果[2]。他们用清水方法(Shimizu method）拍下了空气中α粒子的径迹，记下了α粒子的径迹分为三支——质子、原子核和α粒子的径迹——的碰撞。在那种情况下，α粒子没有贯穿原子核和也没有跟原子核结合，也许因为在碰撞之前α粒子已失去了它的大量的能量。在1926年其他一些关于元素嬗变的实验是氢转变为氦，这是由柏林的F·帕内特和W·佩特尔斯宣告的实验[3]，它们不是放电而是简单的催化作用产生的结果；当用氦原子核轰击氮时，氮变成氟，然后再变成氢和氧，芝加哥大学的W·D·哈金斯对华盛顿国家科学院报告了这一发现。

308 N 射线

在心理学上有趣味的是N射线事件。一个在南希(Nancy)的

〔1〕 Rutherford, *Science*, Vol.62, 1925, pp.210, 211.

〔2〕 *Journal Am. Chem. Soc.*, Vol.45, 1923, p. 2095; *Nature*, Vol.115, 1925, p.493.

〔3〕 *Science*, Vol.64, 1926, p.416.

法国实验家R·布隆德洛特相信自己观察到一种新射线，这种射线是由应变状态的固体如淬火钢发射出来的。据称，这些射线能使涂有微弱发光的磷光涂料的屏幕闪光。[1]有几实验家报告成功了，但在法国、德国和英国有经验的观察家也试作了实验，并没有看到所说的现象。最后，由于原来的观察家们都不能令人满意地接受拍照之类的客观检验，大家就普遍地不相信了。看来，光亮度的变化起因于来自视网膜作用过程的纯粹主观的原因[2]，并且，看来它纯属心理-生理的现象。

热 学

“黑体”实验

B·斯图尔特和基尔霍夫提出了“黑体”实验，但是直到1895—1901年夏洛滕堡（Charlottenburg）的赖克森斯塔尔特（Reichsonstalt）地方的O·卢梅尔（1860—1905）、E·普林舍姆（1859—1917）和F·库尔鲍姆（1857—1927）开始他们的实验之前，实验室研究的这条困难战线上还没有取得什么成果。他们测定了表示在任意给定的温度下不同波长的辐射强度的曲线。这些曲线表明，在任意给定的温度下某一波长的辐射在强度上要超过其他波长的辐射。我们把这个波长称为“最佳”波长。人们发现，这些实验曲线很好地证明了W·维恩（1864—1928）在理论基础上提出的“位移定律”[3]，即绝对温度和最佳波长的乘积是常数的定律。例如，绝 309

〔1〕 *Nature*, Vol.69, 1903, pp. 47, 72, 119, 167（在182页上有一个很好的总的说明）。

〔2〕 *Nature*, Vol.69, 1904, p.378; Vol.70, 1904, pp.198, 530, 作者R·W·Wood; Vol.72, 1905, p.195.

〔3〕 W·Wien, *Sitzungsb.d.Akad.d.Wissensch.*, Berlin, 1893, p.55.

对温度T = 1000°，波长 $\lambda = 3.1\mu$ 的辐射强度为最大；当T = 2000°时，较短的波长 $\lambda = 1.5\mu$ 的辐射强度为极大。这跟维恩的位移定律很好地相一致，因为1000×3.1 = 2000×1.5（取近似值）。卢梅尔、普林舍姆和库尔鲍姆的实验成为普朗克理论研究的前导。

瑞利的理论公式

实验研究和理论研究都日益丰富。瑞利勋爵〔即J·W·斯特劳特(1842—1919)〕[1]在他的1900年的论文中涉及到玻耳兹曼、维恩和普朗克关于“黑体”辐射公式（较早的研究成果），并说：“从理论方面来看，对我来说上述结论跟推测差不多”，“问题是由实验提出来的，但在这期间我冒险地提出了修正……，在我看来这修正更大可能是先验的。”他于是婉转地批评了“能量均分学说”，按照这个学说，“每种振动方式都应当受到同等看待；虽然由于某些尚未阐明的原因，这个学说总的说来是失败了，但似乎有可能的是它可以适用于更沉重的振动方式。”这个均分学说受到数学物理学家麦克斯韦、L·玻耳兹曼(1844—1906)和J·W·吉布斯(1839—1903)的注意。这些伟大的科学先驱在地理上相隔天涯，他们各自在剑桥、维也纳和康涅狄格的纽海文(New Haven)工作。他们都建立了基于概率论的“统计力学”。这些统计方法在辐射理论中开始起着重要的作用。

310 瑞利在推导他的公式时，首先考虑了一很长度为 l 的拉紧了的弦线的横振动。如果a为传播速度，p为任何一种振动方式的迭分振动的数目，λ 为波长，ν 为频率，因为 $\nu\lambda = a$* 以及 $l/p = \lambda/2$，我们得到 $\nu = ap/2l$。依次序从一种振动方式到下一个方式的过

〔1〕 Lord Rayleigh, *Phil. Mag.*, Vol. 49, 1900, p. 539; *Nature*, Vol. 72, 1905, p. 54.

* 此处原文误为“$\nu\lambda \times a$”，本译文已改正——译者注。

程包括了从p到p＋1，或者$(2l/a)\cdot d\nu$的单元变化。如果e表示单个振动方式的动能，那末均分定律要求相应于$d\nu$间隔的动能应当为$(2le/a)\cdot d\nu$。这个公式适用于弦线的所有部分，因而描述了动能的纵向密度。

对于三维情况，我们考虑在边长为l的立方体内的振动。在这里，迭分振动可以在三个方向上发生。设以整数p、q和r分别表示三个方向的迭分振动数。我们可以把p、q、r看作一个点的座标。这样得到的整个点系构成了体积-密度统一体的立方阵列。如果R是从座标原点到这些点中任一点的距离，我们就得到$R^2=p^2+q^2+r^2$。对于频率ν可以得到类似于振动弦线公式的一个公式，即$\nu=aR/2l$、略去dR的高次幂，则R和R＋dR之间的球壳的体积是$4\pi R^2dR$，这个式子也表示了在这个间隔内的点的数目。但由频率ν的表示式得出$d\nu=[a/(2l)]\cdot dR$、将此值代入上式dR中，则点数应为$4\pi(2l/a)^3\nu^2\cdot d\nu$。这个值表示了相当于$d\nu$的振动方式数。如果我们以$\lambda$代替$\nu$，并且记住$\nu\lambda=a$，$\nu d\lambda+\lambda d\nu=0$，我们就得到振动方式数为$32\pi l^3\lambda^{-4}d\lambda$。如果现在我们再按照辐射中能量的相等分布的原理引入假设，即每个振动方式都有同量的动能e，我们得到相应于$d\lambda$和单位体积（$l^3=1$）的动能$32\pi e\lambda^{-4}d\lambda$。如果我们把整个能量（动能加势能）取作动能的两倍，并记住e正比于绝对温度T，则我们得到

$$C_1T\lambda^{-4}d\lambda$$

（式中C_1是常数）用来表示波长从λ到$\lambda+d\lambda$间隔内的单位体积的总辐射能。瑞利知道这个公式与有关长波长λ的实验数据符合得很好，但对于短波就不行了。J·H·金斯和其他人重新审查了瑞利公式的推导。看来它是能量均分定律、（关于能量的）经典热力学定律以及（关于作为电磁现象辐射的）电动力学定律的必然结果。但是，瑞利公式不能正确地描述由卢梅尔、普林舍姆和库尔鲍姆大约在这一时期发表的观测结果。对于很短波长的射线，分歧是很大的。按照这个公式，任一给定温度T的能量主要

311

是在波长很短的光谱部分，因为在那部分λ很小，因子λ^{-4}随波长λ的减小而急剧地增加。在哪儿错了呢？如果能量的吸收和发射是一个连续过程，正如已往一直假定是的那样，那么能量均分定律是作为一种必然结果被证明为成立。这个定律在辐射的场合也正确吗？

普朗克的量子论

普朗克抛弃了能量均分定律，推导出了和观测符合的理论公式。在这个公式的推导中，他大胆地凭藉着一个新的和惊人的假设，这个假设现在使物理科学的许多基础得到了根本的改造。麦克斯·普朗克于1858年生于基尔（Kiel），在慕尼黑读过若干年书，有一年在柏林听了赫尔姆霍茨、基尔霍夫和魏厄尔斯特拉斯的讲课。在慕尼黑当了几年家庭教师。并于1889年在柏林继任了基尔霍夫的职务。1912年他成了柏林的普鲁士科学院的常务院长。他于1896年开始发表关于辐射的论文，但直到1900年他才提出量子论。

312

在普朗克早期的研究中，他对于W·维恩的辐射公式中有λ^{-5}的因子，而瑞利公式中有λ^{-4}的因子有很深的印象。有一个时期普朗克的工作曾受到错误印象的影响，这个印象就是维恩的公式是唯一能够跟热力学第二定律相一致的。由于夏洛滕堡的O·卢梅尔、E·普林舍姆、H·鲁本斯(1865—1922)和库尔鲍姆的“黑体”实验，迫使他不得不抛弃那种观点。普朗克的思辨过程如下：在未知原子的精确结构时，他假定存在以频率ν振动的假想“振子”。振子发出辐射，它本身因此失去能量。除非有新的能量供给振子，否则它会趋向静止。如果有和振子的发射相同频率的辐射落在振子上，则这辐射将被振子吸收。如果吸收周围辐射以保持在一恒定温度的辐射体具有同样频率ν的大量振子，则频率ν的这些振子中的发射和吸收必定处于平衡状态；发射的能量必定等于

吸收的能量。普朗克假设物体中有许多不同的振子群，每一群都有它自己的不同于其他各群的频率。这样一个物体的辐射就如同是一个“黑体”的辐射一样。设Nv是频率为v的振子数（假定是大量的）；设它们的总能为Ev。任何一个振子的能量都是一个变量，在吸收时能量增加，在发射时能量减少。它的平均能量显然是这群振子的总能量被振子数除，即Ev÷Nv。普朗克遇到了这个问题：在任一频率v的Nv个振子中配分能量Ev有多少种方式？如果我们以任何方式无限制地把E_v加以分割，那么配分能量的方式数也是无限的。可是，如果假设Ev是由一定数量P部分所构成，而且它们又是不可分的、有限的和相等的，那么配分的方式数是有限的，并且可以用算术的组合理论来确定它。

313

在两种假说中，一个假说假设振子中的能量有不受方式限制和不受大小限制的可分性，这个假说导致了能量均分学说和这样的辐射公式，普朗克发现这公式与观察结果不符。

于是普朗克着手于不同的假说，这个奇怪的假设是，能量是由不可分的单位（量子）所组成，这些单位仅以有限个数的方式分给具有相同频率v的一群振子中的个别振子，和分给每一个都有特定频率的不同的振子群。这种有限个数使配分方式服从概率论。对于这个大胆的假说洛仑兹评论说：“我们一定不要忘记，有这样的灵感观念的好运气只有那些刻苦工作和深入思考的人才能得到。”[1]

普朗克藉助于W·维恩的“黑体辐射位移律”断定，不同频率的振子的量子不具有同样的大小，它们的大小是和频率v成比例，并可以用hv来表示，其中h是常数，现在称之为“普朗克常数”。这样一来，高频率的能量子要大于低频率的能量子。利用卢梅尔

〔1〕 H·A·Lorentz, *Die Naturwissenschaften*, Vol.13, 1925, p.1081.

和其他人的观察，普朗克得到 $h \simeq 6.5\times10^{-27}$尔格·秒。[1]

如果振子群 $N\nu$ 的动能E是由 p 个不可分割的部分或量子所组成，那么，由组合理论得到这能量在振子中的配分方式的数目如下：

314

$$\frac{(N+P-1)!}{(N-1)!P!}$$

例如，假设频率 ν 的振子数是2，量子数是3，即，$N\nu=2$，$p=3$。按照公式或者通过实验我们发现在2个振子中分配3个量子有四种方式，即：1，2；2，1；0，3；3，0。如果假设另一组具有双倍的频率的振子组，我们有$N_2\nu=3$，$p=5$，那么对这振子组可能有的配分数是21。因此，在这两组加在一起的振子中的配分方式数就是 $4\times21=84$。

设现在把这两组相同的总动能不平均地分给这两个组中，结果，例如，第一组 $N\nu=2$，$p=5$，第二组$N_2\nu=3$，$p=4$，那么在这些振子中的能量配分数对第一组是6，对第二组是15。对两组来说，配分数当为 $6\times15=90$，而84是在第一次计算中得到的。

由此看来，把处在热平衡的物体的定量动能分配给它的各个振子的方式总数是随着在具有相同频率的这些振子组$N\nu$中分配能量的方式而改变的。把总能量分给不同的组有一定方式，对于这些组而言，在物体的振子中配分能量的可能方式的总数是极大值。这个极大值表示了处在平衡中的物体的实际状态，并且得出了每组振子$N\nu$的能量。知道每组$N\nu$的能量$E\nu$，我们就能以除式$E\nu\div N\nu$得到每个振子的平均动能。从这些数据中，我们能够得到频率间隔在 ν 到 $\nu+d\nu$之间的单位体积的动能，或者，如果我们愿意的话。得到波长间隔在λ到$\lambda+d\lambda$之间的单位体积的动能。

---

[1] Max Planck, *Verhandl.d.deutsch.Physikal. Geseuschaft*, Vol.2, 1900, p.237. 普朗克论辐射的主要的早期论文再版于 *Ostwala's KLassiker*, No.206.

普朗克最后得到的辐射公式是复杂的。这个公式给出了波长 315
为 λ 的辐射强度，可以把它写为：

$$hc^2\lambda^{-5}/(e^{\frac{hc}{k\lambda T}}-1) \qquad (\text{I})$$

式中 h 是普朗克常数，K 是另一个常数，称之为玻耳兹曼常数；ch/k = 1.436厘米•度。他发表了以几种略为不同的方式所得出的公式（I）

在普朗克的公式中，因子λ^{-5}随着λ的减少急剧地增加。然而，这个公式没有瑞利公式因短波产生巨大能量的困难。因为分母的值也增加，并且它增加的速率是如此之大，以致整个公式是跟已知的实验结果相符的。

当λT的值小时（即跟ch/k比较是小的时候），普朗克的公式（I）就成为维恩公式。当λT的值大时，它就成为瑞利公式。当普朗克常数 h 许可趋近于零时，也就是当抛弃存在能量子的假定时，在任何λT的值的情况下它都归结为瑞利公式。

普朗克起初假定，吸收和发射两者都是不连续的。在他的1912年的著作《热辐射》第二版中，他为了减少经典理论和量子论之间的差别，只是假定发射是不连续的，后来又回到了他原来的假定。

在相当详尽地叙述瑞利公式和普朗克公式的过程中，我们是想向读者说明物理学所曾遇到的难以逾越的鸿沟，并且指出这门科学跨步前进的重大转折点。

根据普朗克的量子论，能量不会从辐射体中流出，它以各自分离的一些能包的形式放出。能量是成粒状的，但是不同的辐射 316
频率有不同大小的hν粒子。

普朗克的公式得到了物理学家们的注意，但不是由于他的逻辑有很强的说服力（他的论证是复杂的和远非无争论余地的），而是因为它和观测惊人地相一致。量子观念和传统物理学定律之间至今还有不可逾越的鸿沟。

h的数值及其重大意义

普朗克估计h的数值为6.5×10^{-27}尔格·秒。人们要测定小数的第二位是困难的。若干后来的测定如下：W·杜安[1]和F·L·洪德的测定值为$h=6.51\times10^{-27}$；D·L·韦伯斯特[2]的测定值为$h=6.53\times10^{-27}$，E·瓦格纳[3]的测定值为$h=6.49\times10^{-27}$；R·T·伯奇[4]的测定值为$h=(6.5543\pm0.0025)\times10^{-27}$*。关于h的重大意义，J·H·金斯[5]评论道："虽然h的数值很小，但是我们应当承认它是关系到保证宇宙的存在的。如果说h严格地等于零，那么宇宙间的物质能量将会在十亿分之一秒的时间内全部变成为辐射。例如，由于连续地发出辐射，普通的氢原子将开始以每秒一米多的速率收缩，并在10^{-10}秒以后，原子核和电子将碰在一起，并且或许会在辐射的闪光中消失。禁止发射任何小于$h\nu$的辐射的量子论，实际上是禁止了除了具有特别大量的能可供发射的那些原子以外的任何发射。"

317 比热和量子论

分子热或原子热（对单原子物质）是由比热和分子量或原子

---

〔1〕 *Phys.Rev.*, Vol.6, 1915, p.166; Vol.10, 1917, p.624.

〔2〕 *Phys.Rev.*, Vol.7, 1916, p.587.

〔3〕 *Physik.Zeitschr.*, Vol.18, 1917, p.440.

〔4〕 *Phys.Rev.*, Vol.14, 1919, p.368.

* 1921年中国物理学家叶企孙和他的合作者测得$h=(6.556\pm0.009)\times10^{-27}$，这个数值在物理学界使用了十六年之久。参见*Phys.Rev.*, Vol.18, 1921, p.98.——译者注。

〔5〕 J·H·Jeans, *Atomicity and Quanta*, Cambridge, 1926, p.21.

量的乘积定义的。按照杜隆和珀替在1819年的测定，固体的原子热是接近于6的常数。后来通过观测发现，当温度下降时固体比热急剧减少。在1907年人们按照分子的能量沿着三个方向x、y、z均分的理论去寻找这个事实的理论解释做了一些毫无成果的尝试。爱因斯坦[1]抛弃均分理论，在那一年提出了另一个理论，假定分布在振子中的量子以给出了最大的几率的方式存在。原子热作为绝对温度和hν的函数在这里出现。按照他的理论，在低温下的原子热的减少要比实验所表明的快得多。苏黎世的彼得·德拜修正了爱因斯坦的公式[2]，他想象固体的振动能产生从零到被特定的极大值的全部频率的光谱，以此代替每一特定的物质只有一个确定的特性频率的假定。哥丁根的M·玻恩和T·冯·卡尔曼提议修改德拜的理论，从而得到了更加符合实验的结果[3]。他们考虑到了物体的晶体结构，即原子的空间点阵的排列[4]，取代了德拜所作的以经典的弹性理论为基础的发展。

量子论的推广

原始的普朗克的振子被设想为只具有一个自由度；它在一个方向上来回摆动。但是，把量子论应用到固体和气体的运动论中要求把这个理论推广到具有几个自由度的物体上。1911年在布鲁塞尔(Brussels)的索尔末(Solvay)会议上，亨利·彭加勒(1854—1912)强调需要考虑量子在各种可能的自由度中的配分方式。普朗克[5]和索末菲[6]在1915和1916年独立地指出怎样才能实现这 318

[1] A.Einstein, *Annalen d.Phys.*, Vol.22.1907, p.180.
[2] P·Debye, *Annalen d.Phys.*, Vol. 39, 1912, p.789.
[3] M·Born and Th·V·Kármán, *Physik. Zeitschr.*, Vol.13, 1912, p.297.
[4] F·Reiche, *Quanten theorie*, 1921, Chapter Ⅳ.
[5] M·Planck, *Annal.d.Physik.*, Vol.50, 1916, p.385.
[6] A·Sommerfeld, *Annal.d.Physik.*, Vol.51, 1916, pp.1, 125.

种推广。W·威尔逊[1]、P·S·爱普斯坦[2]、K·施瓦兹希耳德[3](1873—1916)和P·厄任费斯特[4]都曾随着这条路线作了进一步的研究。1916年爱因斯坦[5]对普朗克的辐射公式作了重要的新的推导。

对量子论的估价

莱顿大学教授H·A·洛仑兹(1853—1928)在1925年对量子论的估价如下："能量单元理论能发展为普遍的量子论是由于它的惊人的适应能力，因此它能和理论力学的普遍的定理相结合。只要人们探讨的是简谐振动问题，原始的能量单元观念是足够应用的。后来在考虑到'相位积分'或'相空间'的有界区域的大小的情况下，我们也学会使其他的运动'量子化'，这些运动是完全的或有条件的周期运动、甚至是无周期的运动。在这样的场合建立的量子条件总是这样的：所讨论的量只允许取某种单位值的倍数值，而在这些单位值中总是有常数h。现在我们已前进得这样远，以致于不仅依赖这个常数来对辐射强度和强度极大的波长作出解释，而且还依赖它对许多其它场合存在的定量关系作出解释。它结合其他的物理量决定了许多东西，我们仅举出少数几个例子：固体的比热、光的光化学效应、原子中电子的轨道、光谱线的波长、由给定速度的电子轰击所产生的伦琴射线的频率、气体分子可能的转动速度以及组成一个晶体的许多小成份的距离。当我们说，在我们的自然观中正是量子条件使物质结合在一起并防止它通过辐射完全丧失它的能量，我们并没有言过其实。总之，我们正在探讨的

319

〔1〕 W·Wilson, *Phil.Mag.*, Vol.29, 1925, p.795.

〔2〕 P·S·Epstein, *Annal.d.Physik.*, Vol.50, 1916, p.489.

〔3〕 K·Schwarzschild, *Berl.Akad.d.Wiss.*, 1916, p.548.

〔4〕 P·Ehrenfest, *Annal.d.Physik.*, Vol.51, 1916, p.327.

〔5〕 A.Einstein, *Phys.Zeitschr.*, Vol.18, 1917, p.121.

是真实的关系，这是令人信服地十分明显，因为从不同现象中推导出来的 h 的值是一致的，这个值跟25年前普朗克从他那时所掌握的实验数据中计算出来的数值只有很小的差别……当然，新观念和经典力学以及电动力学的融合仍然是一个未来的梦，我们要得到在它的基本原理中容许不连续性的量子力学还相去甚远。"[1]

低　　温

詹姆斯·杜瓦爵士(1842—1923)刻苦地研究了低温下物体的物理性质，他跟伦敦的皇家研究院有46年的关系。他在1893年液化了氢(第213页)，并在1899年使它成为固态。他的关于低温下木炭吸收气体的奇异能力的发现使得1900年到1907年的时期成为令人难忘的时期[2]。他做了有关低温下金属和其它物质的电常数以及化学和照相作用的实验。他发现，在很低的温度下细菌还活着，320 发磷光的有机体在液化空气中停止发光，但当它们变暖时又恢复了它们的发光本领。

氦的液化和凝固

1908年荷兰莱顿的H·开默林·昂尼斯(1850—1926)在绝对温度仅4.3°时完成了氦的液化。在那以后，通过使氦在低压下沸腾达到了更低的温度。人们证实了，在很低的温度下一些金属变成为超导体。看来好象在绝对零度时，原子处于某种形式的静止状态，留下电子可以无阻碍地通过的绝对自由的路径。1919年美国政府给昂尼斯实验用的30立方米的氦。1923年昂尼斯做了一

---

[1] H·A·Lorentz, *Die Naturwissenschaften*, Vol. 13, 1925, p. 1082.

[2] *Smithsonian Report for* 1923, p. 550.

个不成功的凝固氦的尝试。然后，藉助于十二个玻璃的和六个铁质的朗缪尔真空并联而成的装置，在他能够得到最理想的真空（六万五千分之一）下[1]，用蒸发液氦的方法得到了零下272.18℃或绝对温度0.82°。1926年昂尼斯死后四个月，W·H·基桑在昂尼斯的实验室最终使氦凝固了，他是使液态氦既处在高压又处在低温下而获得成功的[2]。氦是在一根放在液氦池中的窄黄铜管内凝固的。当黄铜管内的氦处在86个大气压和3.2°绝对温度或者是处在50个大气压和2.2°绝对温度时，氦就凝固了。氦的凝固曲线是通过变化温度和压力而观测到的。在所有的气体中，氦是最后一个抗拒液化和凝固的气体。

321 热力学第三定律

H·勒·夏忒列（在1888年）和其他人关于自由能的研究被W·能斯特在1906年集中到一个焦点之上，有时候人们把它称之为热力学第三定律，即绝对零度实际上是不可能达到的。按照普朗克的陈述，这定律是在绝对温度的零点时，固体和液体的熵等于零。在G·N·刘易斯作出的陈述中人们看到了某些限制："如果把在某种晶态里的每种元素的熵在绝对零度时取为零，那么每一种物质都有有限的正熵，但在绝对零度时熵可以变为零，并且在这时变成为完全的晶体物质。"[3]

热力学和统计力学

N·玻尔、H·A·克喇末和J·C·斯莱特曾对热力学第一定律的

[1] *Science*, Vol.57, March 30, 1923, p.Ⅶ.

[2] *Science*, Vol.64, 1926, p.132.

[3] G.N.Lewis and M.Randall, *Thermodynamics*, 1923, p.448.

有效性提出了怀疑，他们认为当把它应用到电子上时，它只是一个统计规律。[1]对于大的物体而言，这个定律经受了一切考验，但爱因斯坦在他的狭义相对论中以一种新的形式体系把它跟质量守恒原理合并起来[2]，狭义相对论要求能量守恒定律对于每个座标系都成立。热力学第二定律也仍旧是人们作很多思考的题目。如果世界是有限的孤立系统，那么按照第一和第二定律它的能量是常数，而它的现象是不可逆的，它的熵趋向极大。如果那个极大值达到了，那么世界的有效能是零，所有的运动停止了，并且所有物体都处在同一温度之中。这种终极状态会在有限的时间内达到。G·N·刘易斯说："宇宙走向老年和最终寂死的这种图景在许多人看来似乎是悲观的图景。"[3]世界的熵向着极大增加的陈述"必须受到挑战。"如果麦克斯韦的那个能分开各个分子的"小妖"[4]存在的话，我们生活在一个不可逆现象的世界里就不会是真实的了。但是没有"小妖"的干预就不可能发生这种分开吗？它不可能只是由于机遇而发生的吗？W·吉布斯和L·玻耳兹曼的统计力学已经证明，所谓不可逆现象的可逆并非不可能的，而只是不太可能而已。G·N·刘易斯指出这个观念：[5]"在现代物理学中已经成为一个重要的、而且几乎是最重要的指导原理。"我们应当看到用于解释布朗运动的概率理论，它出现在普朗克辐射公式的推导之中。如果热力学第二定律不是绝对的定律，而仅

322

---

〔1〕 D.L.Webster and L.Page, *Bulletin Nat.Research Council*, Washington, 1921, p.353。

〔2〕 A.Einstein, *Relativity, The Special and General Theory*, New York, 1921, p.54.

〔3〕 G·N·Lewis, *The Anatomy of Science*, New Haven, 1926, p.142.

〔4〕 C·Maxwell. *Theory of Heat*, 7. Ed., 1883, Chap.22. pp. 328, 329.

〔5〕 G·N·Lewis, *The Anatomy of Science*, New Haven, 1926, p.148.

仅是一个高度可几的定律，那末在时间的进程中会出现它的一些例外，而熵朝着一个极大值增加也是未被证明的。例如混合两种气体氧和氮的“不可逆现象”。一个中间被隔开的容器，在它的一边有氧，在另一边有氮。分子数是有限的。如果将隔板作成一小洞，这两种气体会以扩散而混合。有这样一种概率——虽然肯定这种概率很小，然而却是一种概率——依照机遇定律，氧和氮会在某个时刻变成又一次的分开状态，正如一副纸牌，纸牌的一种特殊排列在反复洗牌的过程中肯定会又一次的出现。

光　学

斐兹杰惹和洛仑兹缩短

迈克耳逊和莫雷1887年的实验似乎表明在进行实验的所在地（俄亥俄州克里夫兰的地下室）没有“以太漂移”、即地球在它运动时拖曳着以太跟着它向前运动。这样的结论给物理学家们带来各种各样的困难。摆脱这个困境的方式是什么？1895年，都柏林(Dublin)的G·F·斐兹杰惹[1]（1851—1901）和H·A·洛仑兹[2]独立地作出了大胆的假定：运动物体在沿着它的运动方向缩短了。一码长的棍棒当沿它的长度方向运动时比它静止时短。基于这个假定，迈克耳逊和莫雷的实验能够得到解释，即使把以太看作是静止的、不随着地球运动的。用物质的电学理论来解释这个收缩假说就部分地消除了这个收缩假说的不可思议的情形。洛仑兹在这个假说方面走得更远，他从数学上推导出距离和时间的

[1] *Scientific Writings of G·F·Fitzgerald*, Dublin, 1902, pp. LX, 562; O·Lodge, *Philos. Trans.* A, Vol. 184, London, 1894, p. 749.

[2] H·A·Lorentz, *Verslagen d. Zittingen d. k. Akademie van Wetenschappen*, Amsterdam, Vol. 1, 1893, p. 74.

加法法则。这个加法法则和牛顿力学是相背离的，并且一般都把它称之为“洛仑兹变换。”他已经很接近于现代狭义相对论。

二十世纪的以太漂移实验

D·C弥勒和莫雷制造了一种干涉仪（它的灵敏度约为1887年迈克耳逊和莫雷使用的干涉仪的四倍），并在1902—1904年间在克里夫兰(Cleveland)实验过，目的是想查明斐兹杰惹收缩是否对某些物质会比对另些物质更大。观测证明没有这样的差别。

1905年，当时在苏黎世的**阿耳伯特·爱因斯坦**提出了他的狭义相对论，1915年提出了他的广义相对论，相对论部分是根据迈克耳逊和莫雷关于以太漂移的实验已给出了否定结果的假定。弥勒感到，这种否定效应的解释是不妥当的，并且认为这实验应当在高海拔高度重做。因此他将他的仪器搬到加利福尼亚州的威尔逊 324 山天文台，并于1921年开始观测。在那年弥勒得到了好象是由真正的以太漂移所产生的那种效应，它对应于以太和地球每秒十公里的相对运动。以后对可能的实验错误作了多次的研究，并以地球在空间中的某种假定的运动解释这个现象。但是，起初假定的一些运动没有一种跟实验的结果相一致。可是，几年时间内的全部观测指明，“一个尚未被解释的恒定和前后一致的小效应。”[1] 他还发现，“观测到的以太漂移的方向和大小不依赖于地方时间，而对恒星时间是一个常数。”弥勒认为这意味着“在这些观测中地球轨道运动的影响是觉察不出的……。为了说明这个事实，假定地球在空间中的恒定运动大于每秒二百公里，但是由于某种未知的原因在威尔逊山上的干涉仪中地球和以太的相对运动减小到每秒十公里。”[2]每秒二百公里或更多些的速度是“朝向接近于黄道极的天龙座顶，在赤经262°和赤纬+65°的地方。”迄今，弥勒

〔1〕 D·C·Miller, *Science*, Vol.63, 1926, p.437.

〔2〕 D·C·Miller, 同上, pp.441, 442.

的结果仍未得到证实。事实上，海德耳堡(Heidelbery)的 R·托马歇克[1]完成了两个实验，这两个实验都没有揭示任何以太漂移。在一个实验中他用了充电的电容器，如果它穿过以太运动的话应当产生磁场，但是，甚至于在阿尔卑斯山的少妇(Jungfrau)峰上做实验也没有人观测到磁场；第二个实验最初是由伦敦大学的F·T·特劳顿(1863—1922)和H·R·诺布尔[2]在1903年做的用

325 一根导线把充电的电容器吊起。在有以太漂移的场合，电容器将如此转动，直到和漂移方向成直角。但是，人们没有观测到电容器的转动。这个实验的理论还受到怀疑。1876年罗兰的实验证明[3]，一个带有电荷的和进行快速转动的物体产生了磁效应，在它经受了到处找岔的批评以后，它最终被证实并当作正确的东西被接受了。但是，特劳顿和诺布尔的实验和托马歇克的那些实验完全没有使它们的理论进一步复杂化。关于以太漂移，R·J·肯尼迪以改进了的迈克耳逊的仪器在威尔逊山天文台也得到了否定的结果[4]，为了防止压力和温度的变化，他把仪器完全封装在一个含有氦气的密封金属箱中。关于以太漂移得到否定结果的研究者还有A·毕卡特和E·施塔黑尔，以及C·T·恰斯。前二者是在瑞士的利吉(Rigi)山顶上做的实验，后者是在加利福尼亚州的帕萨丹纳(Pasadena)做的实验。

假定的迈克耳逊和莫雷1887年实验的否定效应成为导致爱因斯坦在1905年提出他的狭义相对论的主要刺激。实验似乎表明，光的速度无论是在沿着地球运动的方向或垂直地球运动的方向上

---

〔1〕 R·Tomaschek, *Annal.d.Phys.*, 4.S., Vol. 78, 1925, pp. 743—756.

〔2〕 F·T·Trouton and H·R·Noble, *Phil. Trans.Roy. Soc.*, London, A. Vol.202, 1904, p.165.

〔3〕 参阅 *Physical Papers of Henry Augustus Rowland*, Baltimore, 1902；其中有门登霍尔(1841—1924)写的纪念词。

〔4〕 R·J·Kennedy, *Proc. Nat. Acad.*, Vol. 12, Washington, 1926, p.621.

都是相同的。由此爱因斯坦假定了相对性原理。他还假定真空中的光速在各种条件下都相等。

北　极　光

这个现象从B·富兰克林时候起就是一个思辨的课题，他认为它是电的现象。1872年佛罗伦斯的G·B·多纳蒂提出，那是由于来自太阳的电射线的结果。柏林的E·哥耳德斯坦认为它们是来自太阳的阴极射线。克里斯提安尼亚(Christiania)的K·伯克兰(1867—1917)采纳了这种观点，制造了一个人造小地球(terrela)的模型，并力图在实验室重现极光现象。把这小地球放在真空管中，并使它受到阴极射线的照射。当使小地球磁化以后，辉光集中在两极附近的螺旋路径上，并在赤道附近有一薄的光圈。C·斯托梅尔精心研究了这些现象的数学理论。 326

北极光的光谱除了一条明显的绿色谱线λ=5577.35Å以外都容易认出是由于大气层中的各种气体发出的，这条例外的与任何化学元素的谱线都不相同的谱线直到1925年多伦多的J·C·麦克伦南和G·M·施勒姆在研究氧光谱上大量氦或氖的掺质效应时才发现了它。[1] 看来是一些早先不知道的氧的光谱的一部分。通过激发氦，氧和氮的混合物，上述谱线被摄照在跟氮的带光谱系的同一底片上，这样一来，在实验室里实际上产生了整个极光光谱。

恒星的直径

早在第十八世纪时天文学家们就观测了一些行星的直径。

〔1〕 J·C·McLennan and G·M·Shrum, *Proc. Roy. Soc.*, London, A. Vol.108, 1925, pp.501—512; *Nature*, Vol.115, 1925, pp.382, 607.

1733年J·布喇德雷给J·斯特林的信中讲道，他用一个有123呎聚焦半径的惠更斯式物镜的望远镜观测了木星的直径。要用十八和十九世纪的仪器观测恒星的直径是太小了。1890年迈克耳逊阐明了天文测量的干涉法。如果望远镜的物镜被有二个小孔或二个狭缝的帽盖盖住，恒星光通过这两个窄缝进入望远镜，我们用这种望远镜进行观察，干涉现象就因这两个像的重叠而形成，当两个狭缝 327 之间的距离逐渐增加时，干涉条纹变得越来越不清楚并且最后完全消失。已经证明的是，如果以狭缝之间的距离去除星光的波长，其商乘以常数1.22，我们就得到了以弧度表示的恒星的角直径。[1]1891年迈克耳逊在利克天文台应用这个方法测定了木星的卫星的直径，但是那时候的仪器不适于对恒星的直径有效地应用这种方法。更大型的望远镜和干涉仪的制造使得在1920年对猎户座明亮的 α 星应用这个方法成为可能，阿拉伯人把这 α 星称之为"贝特尔古斯"（Betelgeuse），意思是"巨人的肩膀。"这个观测是在加利福尼亚州的威尔逊山上由F·G·皮斯做的。相当于我们的"狭缝"的是干涉仪的两面镜子，它们之间的距离大约是3000毫米；以3000毫米除有效波长5750Å或0.000575毫米，并将其商乘以1.22，则得0.047弧秒的数值，这即是贝特尔古斯的角直径。

根据计算，这个角直径和看见70哩外一个直径为一吋的球相同。要以哩来计算贝特尔古斯的直径，我们必须知道它的距离，这个距离约等于175光年。这个星的直径约为二亿四千万哩或是我们太阳直径的300倍。其后不久又发现了比贝特尔古斯大得多的天蝎座星(Star Antares)的直径。

---

〔1〕 A·A·Michelson, *Phil.Mag.*, Vol.30, 1890, p.2; "Light-Waves and their Uses", 1903, p.135; *Science*, Vol.57, 1923, p.703.

红外线光谱

十九世纪关于太阳光谱红外区的辐射热和光的研究是由W·赫谢尔，M·梅隆尼，L·诺比利，S·P·兰利和其他人做的，蒂宾 328 根(Tübingen)的F·帕邢继续研究了这一课题[1]，他在1894年把由兰利达到的从5μ的较低限的研究推广到9.3μ，并在1897年用精制的仪器和精巧的方法达到23μ。因此，光谱的研究方法在那时包含了从紫外0.1μ到红外23μ的光谱的波长范围，近似于八个倍频程的范围。

对元素在红外区发射光谱的早期研究工作者中有帕邢和加利福尼亚大学的E·P·刘易斯(1863—1926)。当刘易斯在霍普金斯大学作实验时[2]，他用凹面光栅很精密地测定了钠、锂、钙、银和其它一些元素的几条红外谱线，目的是为了把罗兰的波长表扩大到光谱的红外区。帕邢应用了光栅摄谱仪，并且正如我们将要看到的一样，他得到了证实里兹组合原则的结果。

帕邢和H·M·朗德尔利用萤石摄谱仪在1910年测定了迄今所得到的发射线的最长波的长度。对于钠光谱它们位于稍大于9μ的区域。朗德尔和密执安大学的E·F·巴克尔对另外一些元素继续作了这方面的研究。

紫外线光谱

玻璃是紫外线的强吸收者，我们使用的是石英、岩盐和萤石棱镜。A·科尔纽测定了太阳的直到2922Å的紫外线光谱，而A·

[1] H·M·Randall, "Infra-red Spectroscopy," *Science*, Vol. 65, 1927, p.167; H·Rubens in *Kultur der Gegenwart* (Physik), 1915, p.196.

[2] E·F·Lewis, *Astrophys.Jour.*, Vol. 2, 1895, pp. 1, 106.

迈塞和E·莱曼在1909年就能测到2912Å。前面（第185页）讲到的研究是在金属紫外线光谱方面进行的。加利福尼亚大学的刘易斯测定了氪和氙的紫外线光谱，并发现氢在紫外线区域的连续光329 谱。自从劳厄和W·H·布喇格时候起就知道X射线是波长非常短的光波。它们在它们所射落的表面上能使电子游离，这一发现对这样一些辐射的研究有很大帮助，这些辐射位于X射线和以前所观察到的紫外线之间的空缺中，而紫外线最远达到比如说在1906年发现的1000Å的赖曼射线。密立根和他的合作者在改进紫外线光谱学的方法上得到成功[1]，他们用了凹面光栅，使得有可能直接测定这个困难区域的波长，他们对原子序数从2到13（氦到铝）的原子中电子的第二环或第二壳层发射的光学光谱做了一些重要的测定。J·J·霍普菲尔德在紫外线的末端摄下了氦、氮和氧的光谱[2]，从而证明了这些气体不是如同原来设想的那样在那个区域中没有射线。

宇 宙 线

最近英国、德国和美国的物理学家以成功的观测惊人地揭示出辐射中存在着包括了比X射线的波长短得多的射线。1903年，E·卢瑟福和J·C·麦克伦南观察到了，把一个绝缘很好的验电器放在带有厚壁的金属盒中发生漏电。这似乎表明存在有很高的穿透性的射线，连金属壁也只能部分地阻止它。德国物理学家A·哥克尔1910年在苏黎世和1911年在伯尔尼(Bern)发现，放在13,000呎高的气球中的验电器表明有象在地球表面上的一样强的穿透辐射。推论是，所说的这些射线不是来自地球上的放射性物质。此

---

〔1〕 *Proceed.Nat.Acad.*, Vol.7, Washington, 1921, p.289.

〔2〕 *Phys.Rev.*, Vol.20, 1922, p.573.

后不久，V·F·海斯[1]和W·科耳赫尔斯特[2]在高度为5.6哩的气球上重做了测量，并且发现辐射要比在地面上大八倍。1922年，在得克萨斯州的凯利田野的R·A·密立根和I·S·鲍恩把气球送到十哩高空，并发现辐射随着高度增加，但增加的速度大约只有海斯和科尔赫耳斯特所说的1/4。为了消除与这些射线的起源有关的疑问，密立根和他的同事在派克峰(Pikes Peak)作了实验，然后又在加利福尼亚的很深的以及盖满积雪的穆尔湖(Muir Lake)和箭头湖(Arrowhead Lake)作实验，选择这些地方是为了免受放射性的污染。在水面下45呎验电器的读数继续保持下降。密立根说：[3]"在穆尔湖上大气的吸收力和23呎的水深相当，因此我们所发现的从外层空间进入到地球的射线有如此之大的贯穿力，以致在它们完全被吸收之前通过了45＋23＝68呎的水，或者是相当于6呎厚的铅。这表明这种射线比以前甚至是想象的任何一种射线要硬得多(更大的贯穿力)。"科耳赫尔斯特在瑞士的更新近所作的实验似乎表明这些射线在银河和仙女座、武仙座方向最强[4]，而密立根早先的结论是，这些射线等量地来自空间的各个地区。密立根发现，这种射线"不是均匀的，而是分布在X射线频率以上很大的一片光谱区域——大约是X射线平均频率的1000倍；这些射线打在物质上时激起了由康普顿效应的理论所预言的频率左右的较弱的射线。"[5]它们占有"三个倍频程宽的光谱区。" 330

对这些射线的研究提出了若干非常基本的问题。密立根和G·H·卡梅伦所相信的实验证据指出了这个结论：除了放射性现象中表现的分裂过程以外，还有在自然界中正在进行的建造过程或化学元素的诞生过程。通过空间发射出来的宇宙线是由这些新诞生 331

〔1〕 V·F·Hess, *Physik.Zeitschr.*, Vol.12, 1911, p.998.

〔2〕 W·Kolhorster, 同上, Vol.14, 1913, p.1066.

〔3〕 R·A·Millikan, *Science*, Vol.62, 1925, pp.445—448.

〔4〕 W·Kolhorster, *Science*, Vol.64, 1926, Suppl.p.Ⅻ.

〔5〕 细节和书目见，*Jour.Optical Soc.of Amer.*, Vol.14, 1927, p.112.

物通过以太送出来的通告。[1]根据爱因斯坦的表明质能关系的方程，当正电子和负电子的结合产生氦原子或其它诸如氧、硅、镁和铁等轻原子时，这些射线表示其精确能量，它们将以以太波的形式发射出来。但人们必须警惕仅仅是数字上的偶然的巧合。

关于光谱成就的总结

密立根总结光谱研究的成就如下："用以看到不可见的以太波的新实验技术的发现……，在过去的两年内已经完全填平了在人工电磁波和热波之间的鸿沟，并在短波区域，热火花真空度谱术和β射线的分析法实际上完全弥合了光学和X射线区域之间的裂缝，而远在镭的γ射线以上的区域，一组新的几乎无限高频的射线已被发现。从频率为每秒十万亿亿次到频率为零（即到静电场）的连续区域内，所有这些波都具有完全相同的特性，诸如传播速度、偏振、电和磁矢的关系等，这就要求适合于一切波长的同一种传送机制或介质，不管它叫什么名字，或者叫'宇宙以太'或者叫'空间'，后面这个术语不再意味着虚空，而是被赋有确定的性质的虚空。"[2]

332

光 量 子

爱因斯坦作出了除热辐射以外的量子论的另一个早期应用。[3]他把它应用于光。普朗克将它的振子当作以量子hν的形式发射频率ν的辐射、并且也以分离的形式吸收辐射的物体。如果一

[1] *Science*, Vol.67, 1928, p.401; Vol.68, p.279.
[2] R.A.Millikan, *Proceed.Am.Phil.Soc.*, Vol. 65, 1926, p. 74.
[3] A.Einstein, *Annal.d.Physik.*, Vol.17, 1905, p. 132; Vol. 20, 1906, p.199; Vol.47, 1915, , p.879; *Zeitschr. f. Physik*, Vol.31, 1925, p.78;.

个物体发射量子、而另一个物体吸收它们。那么在两个物体之间的空间中发生了什么呢？爱因斯坦提出的观点是，在这两个物体之间通过的能量同样象是以光速飞行的量子(光量子)组成的。这样一来，可见光线以及不可见的光线都被假定为彼此独立地飞过空间的孤立成分组成的。这个理论类似于牛顿的微粒说，但是在量子论中不可见光的部分由于具有较高频率所以就较大，而牛顿的观点是红色微粒大于紫色微粒。爱因斯坦为了摆脱从麦克斯韦的电学理论和电子论中作出的与观察不符的结论而提出了他的光量子。他的量子已证明在解释荧光、磷光和光电现象方面是有助益的。

支持光量子假说的一个实验结果是“康普顿效应”，它是由那时在圣路易斯的华盛顿大学的A·H·康普顿[1]得到的，以后杜安[2]和罗斯[3]对它作了严格的审查后予以证实。在康普顿的实验中，发现被固体散射的X射线具有小于初始射线的频率。他的以量子论为根据的解释是，假定一个光量子跟一个其质量为(X射线的)量子十倍的自由电子相碰撞。这量子被撞回，并从较高频率变成较低频率、从兰色向红色变化。这就是，具有能量$h\nu_0$和动量$h\nu_0/C$的量子在跟自由电子碰撞时，把它的部分能量传给电子，并且成为一个新的和较小的量子$h\nu$被撞回。这个实验不允许根据老的光的波动说来作解释，而是非常有利于量子论。

333

佛科的实验和现代的观点

1850年佛科的判决性实验证明，光的速度在水中比在空气里

---

〔1〕 A·H·Compton, *Phys.Rev.*, Vol. 21, 1923, pp.483—502; Vol.22, pp.409—413.

〔2〕 W·Daune 和合作者。见 *Proceed.Nat.Acad.*, Washinyton, Vol.11, 1925, pp.25—27.

〔3〕 P·A·Ross, *proceed.Nat.Acad.*, Vol. 9, 1923, p.246; Vol. 10, 1924, p.304.

小，这导致了放弃牛顿的发射说。近来怎么可能恢复微粒说呢？回答是，由于种种理由佛科实验已不再被认为是判决性的了。A·伍德[1]这样论证道："我们错误地解释了折射现象。实际发生的是，当微粒达到水或其它介质的表面时，它的平行于表面的速度分量被一种摩擦性质的作用减少了。它的垂直于表面的速度分量仍然不变。因而在水中的速度小于在空气中的速度。这不是我们的理论，而是我们把它应用到这个特殊问题上时搞错了。"

X射线的性质

起初X射线的性质是费解的。伦琴认为它们是纵波，但是C·G·巴克拉于1905年对部分偏振的检测否定了那个猜测。剑桥的斯托克斯和柯尼希斯堡(Königsberg)的E·维谢尔特在1896年提出假说：X射线是以太中的波，而其他人认为是飞行粒子。1912年慕尼黑的麦克斯·冯·劳厄[2]做了一个得到干涉现象的很好的实验。早先，最精致的衍射光栅也不能显示X射线的一点弯曲。劳厄把一个具有规则间隔的原子的晶体当作一个天然光栅使用，从而能得到光谱的结果，并证明X射线有从 1×10^{-9} 到 5×10^{-9} 厘米的波长范围。因此，X射线看来是波长很短的光波。

334

现在，物理学家们以变易的立场看待光和X射线，有时把它们看成量子，有时把它们看成波。波动说的力量在于它能容易地解释光的干涉现象。只能以波动论解释这类现象的说法是并未得

---

〔1〕 Alex·Wood, *In Pursuit of Truth*, London, 1927, p.47. 根据"波动力学"的理论来解释佛科实验的，见 Ludwing Flamm, *Die Naturwissenschaften*, Vol.15, July 15, 1927.

〔2〕 W·Friedrich, P·Knipping und M·Laue: *Sitzber Bayer. Akad., Math.-phys.* Kl. 1912, pp.303—322, 363—373; *Jahrbuch für Radioaktivitat und Elektronik*, Vol.11, 1914, p.308.

到证明的。事实上，哈佛大学的W·杜安[1]证明了用量子论解释衍射、薄片颜色和晶体光栅现象的可能性。加利福尼亚大学的G·N·刘易斯从根本上修正了我们的时间和因果观念，发现了用量子论解释干涉时有可能不用发光的以太[2]。但现在，这些观点仅是聪明的暗示。

光电现象和量子论

1887年H·赫兹研究了电火花的紫外光照射在火花隙缝的负电极上时会有助于放电。一年后，德累斯登(Dresden)的W·霍尔瓦克斯(1859—1922)发现在光的影响下，物体释放出负电。P·勒纳发现，当紫外光和甚至是X射线落在某些物体上时，无论这些物体是露在空气中或在真空里，都会有大群电子放射出来。被抛出的电子速度不取决定于轰击光的强度，而是取决于它的波长——波长越短，速度越大。红光和红外光不能产生可觉察的抛射。根据光的波动论不能找到关于这些现象的令人满意的解释。爱因斯坦指出了一个很容易的根据量子论的解释。物体的表面通过单个量子吸收辐射。每次吸收的量子$h\nu$打出一个电子，它的能量消耗在两个方面：一是把电子从物体拉出的功；另一方面是给电子动能$\frac{1}{2}mv^2$。红光和红外光对于把一个电子从物体中拉出是太弱了。我们有爱因斯坦所建立的重要的方程：$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - P$。这个方程已在实验中被用来测定不同金属的P值和h的值。爱因斯坦方程的验证使R·A·密立根[3]注意到以光波进行光电实验，还引起了F·C·布莱克和W·杜安[4]、M·德布罗意[5]和C·D·埃利

335

〔1〕 W·Duane, *Proceed.Nat.Acad.*, Vol.9, 1923, p.158.

〔2〕 G.N.Lewis, *Anatomy of Science*, p.119.

〔3〕 R·A·Millikan, *The Electron*, chap.X.

〔4〕 Daune, *Phys.Rev.*, Vol.10, 1917, pp.93, 624.

〔5〕 Maurice de Broglie, *Third Solvay Congress*, 1921.

斯[1]注意以X射线和γ射线进行实验。按密立根的意见，这个方程"的重要性跟麦克斯韦方程并列"，并且"已破坏了现有的学说和要求一个关于以太物理学和物质物理学的关系的新的观念体系"。[2]

当变化是在从$\frac{1}{2}mv^2$到hν的反方向进行时，就发生了一个有意义的情况。当真空管中的电子雨（阴极射线）落在对阴极上时，产生了两种X射线，即"标识辐射"和"轫致辐射"。Ch·巴克拉，W·H·布喇格，和W·L·布喇格，G·莫塞莱，C·G·达尔文，M·西格班，W·杜安，A·W·赫尔和其他人都研究过这种现

336 象。"轫致辐射"形成了连续光谱，这光谱突然停止在某一高频上。根据量子论，这意味着电子的能量$\frac{1}{2}mv^2$一般部分地转变为其它形式的能量。在这过程中hν可以小于$\frac{1}{2}mv^2$。但如果hν较大，没有足够能量来产生X射线辐射，光谱就突然到了终点。[3]我们暂停一会，先评述一下"标识辐射"，它确实是一种短波线光谱，大抵起源于对阴极的原子最内层，它的结构决定于构成对阴极的物质，所以我们在这里有了一种测定存在于对阴极中的化学元素的X射线光谱分析，它和本生、基尔霍夫的光学光谱分析一样。这种"标识辐射"可以排列成几个系列，短波的K系，长波的L系，直到更长波的M系[4]。我们以后会看到，如同莫塞莱证明过的一样，这些系是以一定的规律跟周期系中元素的原子序数相关。这些"标识"的X辐射在K、L、M系中的每个系的短

〔1〕 C·D·Ellis, *Proceed.Royal* Soc., A, Vol. 99, 1921, p.261; Vol.105, 1924, p.60.

〔2〕 *Proceed.Am.Phil.Soc.*, Vol.65, 1926, p.68.

〔3〕 W·Duane and F·L·Hunt, *Phys.Rev.*, Vol. 6, 1915, p. 166; F·C·Blake and W·Duane, *Phys.Rev.*, Vol. 10, 1917, p.624.

〔4〕 F·Reiche, *Die Quantentheorie*, Berlin, 1921, pp. 140, 141, 142.

波端还具有一个连续光谱。这连续带谱突然终止在它的长波的一边，而“轫致辐射”的连续光谱突然终止在它的短波的一边。玻尔藉助量子关系对相邻子每个系的连续带作出了扼要的解释。[1]

巴尔末公式和里德堡常数

在半个多世纪以前，人们已描述了许多发光气体和蒸汽的光谱线，对可见光谱以及靠近紫外区的光谱制成了波长表。但是在1884年巴尔末宣布他的众所周知的公式以前，人们还未发现谱线的分布规律。J·J·巴尔末(1825—1898)是巴塞尔(Basel)女子学校的教师和家庭教师，于1884年6月25日将他的关于氢光谱的论文呈交到巴塞尔科学学会。这是他的第一次研究，是在他六十岁时进行的。巴尔末[2]考虑了氢光谱中四条明显的谱线的波长以及在1879年被波茨坦(Potsdam)的H·C·福格尔(1841—1907)在紫色区和紫外区中发现的若干新线的波长，以及被哈金斯观测到的某些白星光谱中的若干谱线的波长。巴尔末发现，四条最重要的谱线的波长比率能够用极小的数字表示出来。然而，这些似乎并不类似于声学上的泛音。通过起初考虑的仅仅四条最重要的氢光谱，巴尔末逐渐地得到一个有基数或因子为3645.6×10^{-7}毫米的公式。将这个基数分别乘以9/5、4/3、25/21和9/8就得到了这四条线的波长。如果将4/3写成16/12，9/8写成36/32，那么这四个分子数看来是3、4、5、6的平方，而每个分母各比自己的分子数小4。综合起来，巴尔末写成公式$[m^2/(m^2-n^2)]$，式中m和n是整数。取$n=2$，$m=3$，4，5……，他得到一系列比例数，当把它们乘于基数时，就以惊人的准确度得到了肯定属于氢

[1] A·Sommerfeld, *Atombau etc.*, 4·Ed., 1924, p.749.

[2] J·J·Balmer, *Verhandl.d.Naturforsch.Gesellsch.in Basel*, Vol.7, Basel, 1885, pp.548—560. 第二个通报是在750—752页上。也见 *Annal.d.Physik*, Vol.25, 1885, p.80.

的九条光谱线，以及被哈金斯在白星光谱中发现的和认为是属于氢的五条附加线。巴尔末的公式可以作为后来的光谱公式的模型，并为光谱线的理论构成磐石般的基础。在最近的文献中，这个公式有时被描写成稍为不同的形式。

瑞典隆德(Lund)大学的J·R **里德伯**(1854—1919)[1]当他在1890年在这个大学当讲师时作出了光谱线系的公式：

338

$$n = n_0 - \frac{N_0}{(m+\mu)^2}$$

在这里，波数$n = 10^8\lambda^{-1}$，波长λ以单位Å表示，m是任意一个正整数，No＝109721.6，是对所有的光谱系和所有的元素都相同的常数，n_0和μ是各系特有的常数。No，或No乘以光速C，被称之为“里德伯常数”。里德伯讲道，对每一种元素双重线或三重线的波数差是个常数。在这时，里德伯已把他的公式应用到周期系中当时已知的前面三族元素上。他和巴尔末各自独立地工作着。1896年巴尔末[2]作出了一个新公式，这个公式再现了汉诺威(Hanover)的H·**凯瑟**和C·**龙格**从观测上测定的锂和铊的光谱线系。巴尔末还再现氦线的不同的系。里德伯的研究这时引起了巴尔末的注意，而且巴尔末讲到，除了里德伯常数对所有元素都是相同的、而他自己的常数对每个元素都有一个特定值以外，他自己的公式和里德伯的公式几乎是相同的。

里兹的组合原则

W·**里兹**(1878—1909)是一个天才的瑞士的物理学家，死在壮年时期，但仍能丰富数学物理学并开辟光谱学中的新道路。他提

---

〔1〕 *Phil.Mag.*, 5.S., Vol.29, 1890, pp.331—337.

〔2〕 J·J·Balmer, *Verhandl.d.Naturforsch.Gesellsch. in Basel*, Vol.11, 1896, pp.448—464.

出了也为里德堡所承认的线光谱的组合原则[1]；“依照要么是系公式本身，要么是其中的常数的加减组合，就得到了新公式……它能使人们从那些早先已知的光谱线中计算出新发现的谱线。”或 339 者，更特殊地以下列形式：每次观测到的频率ν可以设想为两个光谱项ν'和ν''之差，即$\nu=\nu'-\nu''$。在研究玻尔理论中的原子的不同能级时这个原则起了重要的作用。一般地说，人们已发现它是适用于从红外线到紫外线甚至于到X射线的整个光谱区域的统一的定律。让我们举例说明它的应用。如果我们把巴尔末公式写成今天的形式：

$$\nu=R\left(\frac{1}{n^2}-\frac{1}{m^2}\right)$$

式中$R=109677.7\text{cm}^{-1}$，$n=2$，$m=3$、4、5……，于是，对氢线H_α，人们有

$$\nu'=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{3^2}\right)$$

对 H_β

$$\nu''=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{4^2}\right)$$

接着里兹的组合原则就产生了一条新线：

$$\nu''-\nu'=R\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{4^2}\right)$$

如果对H_γ

$$\nu''=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{5^2}\right)$$

同样，用$H\alpha$和$H\gamma$、根据组合原则就得到：

$$\nu''-\nu'=R\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{5^2}\right)$$

〔1〕 W.Ritz, *Gesammelte werke, Oeuvres*, Paris, 1911, P.62.也见 *Annal.d.Phys.*, Vol.25, 1908, pp.660—696.

这些理论结果已被F·帕邢[1]在实验上加以证实，他在红外区域发现了两条强的氢线，它们构成氢光谱线系。进而又由F·S·布
340 喇开从实验上发现了这些谱线的其他成员[2]，他还观测到了以$n=4$和$m=5$、6……确定的新线系的头两条光谱线。如果把Hα线的频率看作两个光谱项之差，以里兹原则就得到了包括$n=1$，$m=2$，和$n=1$，$m=3$的两种频率。这些又提示了$n=1$，$m=2$、3、4……的线系，它们由T·赖曼[3]和R·A·密立根[4]在紫外区实际上观测到了。

带光谱

在发光固体的连续光谱和发光气体的线光谱之间有带光谱。这样称呼它是因为由于很小的弥散现象使它们看起来象是连续的，它们实际是由彼此靠得很紧的有一些凝聚点的谱线所组成的。巴黎的H·A·德斯朗德雷在1885年对它们进行了充分的研究。正当巴尔末建立他的线光谱公式的时候，德斯朗德雷从大量的经验资料中得到一个公式，这个公式成为以后发展的一个模型[5]。带光谱是含有一个原子以上的分子的标识光谱，正如线光谱是单原子的标识光谱一样。

哥本哈根的N·布耶伦、波茨坦的K·施瓦兹希耳德[6]、和隆

---

〔1〕 F·Paschen, *Annal.d.Phys.*, Vol.27, 1908, p.537.

〔2〕 F·S·Brackett, *Astrophys.Jour.*, Vol.56, 1922, p.154.

〔3〕 Th·Lyman, Astrophys. Jour., Vol.23, 1906, p.181; Vol. 43, 1916, p.89.

〔4〕 R·A·Millikan, 同上, Vol. 52, 1920, p.47; Vol. 53, 1921, p.150.

〔5〕 见A·Sommerfeld, *Atombau u.Spektrallinien*, 4. Ed., 1924, p.719.

〔6〕 K·Schwarzschild, *Berlin Sitzungsber.*, April, 1916, p. 548.

德(Lund)的T.黑尔林格[1]根据量子论和玻尔的理论对德斯朗德雷的公式作了解释。施瓦兹希耳德把带光谱描述为相当于吸收气体分子的转动的不同状态。这现象是复杂的，因为它既涉及了振动又涉及了转动。从光谱出发，计算是由包含两个原子的分子的转动惯量和振动频率所组成。带光谱分为三类(1)仅仅由于分子的转动所产生的在红外光谱顶端的光带；(2)由于振动和转动二者所产生的光带；(3)涉及分子的振动和转动以及电子运动的光带。"现在应用到带光谱中的量子论……把这三类带光谱解释为由于分子定态之间的跃迁各自伴随着转动量子数、转动和振动量子数、以及最后一类即转动、振动和电子的量子数的变化。"[2]

34'

带光谱的精细结构被解释为部分地是由于分子之中同位素的不同。这样，具有原子量为35或37的Cl±的HCl，产生了对应于$HCl_{(35)}$和$HCl_{(37)}$的带光谱线，它们的波长稍有不同，所以除了二者光谱的重叠以外，还有两条光谱线的明显的精细结构。分子转动的离心力在某些场合可能有足够的强度足以使分子发生分裂，正如哈佛的R·S·麦利肯[3]所指出过的在氢化钙中的情形一样。R·T·伯奇[4]，J·C·斯莱特[5]R·S·麦利肯[6]R·

〔1〕 T·Heurlinger, *Dissertation*, Lund, 1918; *Phys.zeitschr.*, Vol.20, 1919, p.188.

〔2〕 E·C·Kemble, *Bull.Nat.Research Council*, Vol.11, No. 57, 1926, p.12.

〔3〕 R·S·Mulliken, *Phys.Rev.*, Vol.25, 1925, p.509.也见J·Franck和P·Jordan, *Anregung von Quantensprüngen durch Stösse*, 1926, p.249.

〔4〕 R·T·Birge, *Nature*, Vol.116, 1925, pp.170, 207, 783; Vol. 117, pp.81, 229, 300.

〔5〕 J·C·Slater, *Nature*, Vol.117, p.587.

〔6〕 R·S·Mulliken, Phys.Rev., Vol.26, 1925, p.561.

梅克[1]和F·洪德[2]都通过把原子论中有关电子系的一些概念推广到分子中而着手建立了分子理论[3]。因此，伯奇作出了概括："与分子中价电子相关的能级和与原子中价电子相关的那些能级在一切本质方面是一致的。"[4]

连续的原子光谱

实际上有分子的连续光谱，但是，说也奇怪，实际上还有原子的连续光谱。这个事实是由霍普金斯大学的R·W·伍德[5]在关于钠蒸汽的实验中首先揭示出来的。J·霍尔兹马克作了进一步的观测。他们看到，钠吸收线的序列在密度上连续地增加到这线系的尽头，并且在获得连续性之后还伸入到紫外区。

哥丁根的J·哈特曼[6]在恒星光谱中观测到离解氢的以巴尔末系为极限的连续发射和吸收带。正如前面讲到的，人们还知道在X射线区也有连续光谱。

玻尔在1922年根据频率条件$h\nu = E_2 - E_1$来考虑邻近线光谱系的极限的这些连续光谱的理论。[7]

---

〔1〕 R·Mecke, *Naturwissenschaften*, Vol.13, 1925, p.698, 755.

〔2〕 F·Hund, *Zeitschr.f.Phys.*, Vol.36, 1926, p.657.

〔3〕 详见，*Bulletin of the National Research Council*, Vol.11, Part 3, 1926, No.57. 哈佛大学E.C.肯布尔，加利福尼亚大学R.T.伯奇，密执安大学W.F.柯尔比，纽约大学F.W.卢米斯和耶鲁大学L.佩奇所做的关于气体中的分子光谱的报告。

〔4〕 R·T·Birge, *Nature*, Vol.117, 1926, p.301.

〔5〕 R·W·Wood, *Phil.Mag.*, Vol.18, 1909, p.530.

〔6〕 *Phys.Zeitschr.*, Vol.18, 1917, p.429.

〔7〕 见A·Sommerfeld, *Atomban etc.*, 4.Ed., 1924, p.749.

磁光和电光现象

我们已经看到(第243页)，法拉第在1845年发现了光的偏振面在磁场中的转动。和这个法拉第效应相联系的是，在过了1/4世纪后由格拉斯哥的约翰·克尔[1](1824—1907)所观察到的现象，即，在光从磨光了的磁体极面上反射时发生了偏振面在磁场中的转动。克尔于1876年能够在格拉斯哥的英国协会会议上报告这个发现。许多物理学家在不同的磁化方向、不同的入射角和不 343 同的光波波长之下，观测了这个很细致的现象。1890年柏林的H·杜·博伊斯，1906年威斯康星的麦迪逊城(Madison)的L·R·英格索尔，以及1912年伦贝格(Lemberg)的S·洛里亚对这个效应于颜色的依赖关系作了特别的考察。

克尔效应的理论引起了许多人的注意。哥丁根的W·佛克脱(1850—1919)从现代电子学的观点研究出了一种克尔现象的理论[2]。

经常讨论到的与克尔效应有关的效应(虽然在特性上不是光学的效应)是由E·H·霍尔于1879年在霍普金斯大学的劳兰德实验室观察到的效应[3]，它指出，在一个薄金属板里，垂直于板的磁场会使通过金属的电力线发生弯曲。

阿姆斯特丹的P·塞曼在1896年观察到一个非常惊人的现象[4]，即光谱线的磁分裂(第173页)。据发现，光谱线在磁场中被分成双重线或三重线。

---

〔1〕 J·Kerr, *Phil.Mag.*, S.5., Vol.3, 1877, p.321.

〔2〕 见L·R·Ingersoll's report in *Bulletin Nat. Research Council*, Washington, Vol.3, Part 3, 1922, p.260.

〔3〕 E·H·Hall, *Am.Jour.of Science*, Vol.20, 1880, p.161.

〔4〕 P·Zeeman, *Proceed.K.Akad.v.Wetensch*, Amsterd., Vol.5, 1896, pp.181, 242.

奋力研究这个现象的理论的许多物理学家中有H·A·洛仑兹和J·拉莫尔；用量子论的观点来注意研究这个现象的有德拜、索末菲、玻尔等人[1]。

在复杂结构的光谱线中出现了所谓反常效应，在这个效应中从跟磁力线垂直的方向观察到一条光谱线被分成许多谱线，被分成四条、五条、六条或更多的分线[2]。P·W·伍德首先在带光谱中 144 观察到塞曼效应[3]。但对反常塞曼效应尚未做出令人满意的解释。

类似塞曼效应的电效应是由亚琛的J·斯塔克[4]在1913年通过应用极隧射线观察到的。氢的光谱线在电场中被分成一组彼此靠近的线，这被称之为“斯塔克效应”。它不能由经典理论来作解释，但容易由量子论来解释，例如玻尔[5]、爱普斯坦[6]和施瓦兹希耳德[7]所提出的那种解释。

力　学[8]

狭义相对论

我们已经讲过，1887年迈克耳逊和莫雷的实验成果被解释为

---

[1] 见 A·Landé, *Die neuere Entwicklung der Quantentheorie*, 1926, pp.55—57.

[2] A·Landé, 同上, pp.67—71.

[3] R·W·Wood, *Phil.Mag.*, Vol.10, 1905, p.408; Vol. 12, 1906, p.329; Vol.27, 1914, p.1009.

[4] J·Stark, *Sitzungsber.Berliner Akademie*, 1913, p.932.

[5] N·Bohr, *On the Quantum Theory of Line Spectra*, Part Ⅰ, Ⅱ, 1918.

[6] P·Epstein, *Phys.Zeitschr.*, Vol.17, 1916, p.148.

[7] K·Schwarzschild, *Sitzungsber. Berliner Akademie*, May 11, 1916, p.548.

[8] 关于十九世纪的事件概要参阅 Horace Lamb 的讲义, *The Evolution of Mathematical Physics*, Cambridge, 1924.

表明在实验的地方根本不存在以太风或以太漂移。正如我们已经讲过的那样，无意接受以太随地球运动这个结论的人，斐兹杰惹在英国和洛仑兹在荷兰独立地寻求另一种方法来摆脱这个困境，他们提出，假定运动着的客体在它的运动方向上收缩、而当它的速度增加时其收缩也增加，根据这个假定这个实验就能得到解释。爱因斯坦在1905年走得更远并且作出了重要的概括，这就是闻名的“狭义相对论”。“洛仑兹变换”在这个理论中是成立的。不管以太是否存在，他根据尽可能少的假设开始建立起一种理论。两个必要的假设成为这个理论的基础。一个假设是，光在真空中的速度是常数并与光源的运动无关。荷兰的天文学家W・德西特通过根据对双星的观测的考虑，证明这种独立性是存 345 在的。[1]另一个假定是在有限意义下的“相对性原理”，我们把它叙述如下：假设第二个坐标系统相对于第一个坐标系统是没有转动的均速运动的坐标系统，那么，自然现象相对于第二个坐标系统按照相对于第一个坐标系统时同样的一般规律发生发展。因此，如果在第二个系统为一码尺的棒，在第一个系统的观察者看来，其长度为$\sqrt{1-(v^2/c^2)}$（式中v是第二系统相对于第一系统的匀速度，C是真空中的光速），那末，在第一个系统中的一码长的棒在第二个系统的观察者看来应当显示出相同的长度$\sqrt{1-(v^2/c^2)}$。

伴随着相对论的讨论是对伽利略和牛顿运动定律的严格审查。[2]第一定律（惯性定律）讲到，处在静止中的一个孤立物体将保持在静止状态；如果它是处在运动中，那么它将以同样的速度在直线方向上继续运动下去。但是，据解释，我们并不知道自然界中某个物体（既不是在地球上、也不是在太阳或星星上）是

[1] W・de Sitter, *Physik.Zeitschr.*, Vol.14, 1913, p.429, 1267.

[2] 参阅，例如E・Freundlich, *Grundlagen der Einsteinschen Gravitations theorie*, Berlin, 1920, pp.29—42.

处在绝对静止状态。静止只能是相对于某些坐标系统而言。爱因斯坦对他称为“伽利略坐标系统”的系统作了严格的考察，在这种坐标系统中惯性定律相对于这种系统是成立的，并且在这种坐标系统中没有引力场存在，因此，这个坐标系统不是严格地依附于地球的。“可见的恒星是惯性定律确实对它们高度近似地成立的物体……。伽利略-牛顿的力学定律可以看成是只对伽利略坐标系有效。”爱因斯坦对斐索的关于光在通过管子流动的水中的速度的试验（见第155页）作出了新的解释。斐索的结论是以太被水顺着拖曳，但其速度小于水的速度。爱因斯坦摒弃了以太[1]，而假定光在水中的速度对于水是否在管中运动都是相同的，他把斐索实验解释为应用到如下问题的“洛仑兹变换”的直接的和准确的结果，这个问题是，给出光在水中的速度和水在管子中的速度，求出光相对于管子的速度。

346

广义相对论

爱因斯坦1905年的理论仅限于均速运动。1915年他把这个理论推广为一切运动的相对性理论。广义相对论根据三个公设：第一，“广义相对性原理”，根据这个原理，一切坐标系统对于物理现象的描述都是等价的；第二，“等效原理”，按照这个原理，惯性质量等于引力质量，这个原理是根据所有的物体都有同样的加速度这一事实；第三，“马赫原理”，按照这个原理，在引力场中，空间的性质是由物体的质量所决定的。因此广义相对论提供了一个引力理论，并且，实际上把引力归结为时空性质。引力的力场被时空连续区的曲率所代替。引力现象受到由物质决定的非欧几里得的时空连续区的几何性质的制约。

---

〔1〕 A·Einstein, *Relativity the Special and general theory*, transl.by R·W·Lawson, New York, 1921, p.46.

这个极为深奥的理论得到了全世界的注意。有素养的数学家们致力于更完满的解释或者还更进一步的概括。苏黎世的H·韦耳[1]和英国剑桥的A·S·爱丁顿[2]在广义相对论中作出了包括电现象的解释。加利福尼亚州伯克利的R·C·托耳曼[3]，巴黎的E·卡坦[4]，马萨诸塞州的剑桥的G·D·伯克霍夫[5]采用别的新奇的观点。在这个领域的研究者的数量增加到很大的比例。人们保持着一种批判的态度。但是也有少数作者坚决反对这个理论。在反对者当中有C·L·普尔[6]、T·J·J·西伊[7]、Ph·勒纳[8]和P·潘勒韦。一批观察天文学家和实验物理学家致力于检验广义相对论。迄今为止，没有一个实验物理学家出示了跟广义相对论相矛盾的实验。

讲到对这理论的一些检验，我们要提到，按照广义相对论所得出的行星的运动稍微不同于牛顿的万有引力定律所得到的结

---

〔1〕 H·Weyl, *Space, Time, Matter*, transl. by H·L·Brose, New York, 1921.

〔2〕 A·S·Eddington, *Space, Time, and Gravitation*, Cambridge, 1920; *Report on the Relativity Theory of Gravitation*, London, 1920.

〔3〕 R·C·Tolman, *The Theory of Relativity of Motion*, Berkeley, 1917; *General Electric Review*, Vol. 23, 1920, p. 486.

〔4〕 E·Cartan, *Journal de mathématique*, 9. S., Vol. 1, 1922, P. 141.

〔5〕 G·D·Birkhoff, *Relativity and Modern Physics*, Cambridge, 1923.

〔6〕 C·L·Poor, *Gravitation versus Relativity*, 1922.

〔7〕 T·J·J·See, *Electrodynamic Wave-theory of Physical Forces*, Vol. Ⅱ. *New Theory of the Aether*, Kiel, 1923; *Astronomische Nachrichten*, Feb., 1926.

〔8〕 Ph·Lenard, *Jahrb. d. Radioakt. u. Electr.*, Vol. 15, 1918; p. 117; Vol. 17, 1920, P. 307.

果；例如，水星椭圆轨道的长轴在一个世纪里应当绕着太阳转动43弧秒。勒维烈在1859年和 S·纽科姆在1895年实际上已发现了水星轨道近日点的运动每世纪约43弧秒，他们不能根据牛顿力学来解释它。这样一来，相对论似乎解释了牛顿力学难于解释的现象。纽科姆在以后的计算中得到41弧秒。但是，相对论和观察事实之间密切的一致性还受到天文学家E·格罗斯曼的打扰，[1] 他严格地审查了纽科姆的工作，并且对大量的观察资料以多少不同的挑选和处理方法而在一组资料中得到近日点的运动为每世纪+29″，在另一组资料中得到的是每世纪+38″。按照格罗斯曼的说法，在爱因斯坦的理论数值和他自己的数值之间有14″和5″的误差。根据相对论，对于较高偏心率的椭圆轨道的近日点运动也较大，就象水星一样。对于偏心率小得多的其它行星，由相对论所预言的近日点的运动是如此之小，以致于不能发觉它。[2]

348

按照广义相对论，当光线通过引力场时它会偏离它的直线路径。当日食时，太阳附近的恒星变得可见并能被摄照。如果把这样的恒星照片和在夜晚时的同一颗星的照片相比较，在日食期间的星体的表观相对方位能跟其它时候的它们的方位相比较。光线的弯曲会改变星体的表观位置。1919年皇家天文学会和伦敦皇家学会派出探险队到巴西的索布拉尔（Sobral）和西非洲的普林西普岛（Principe），并在那里得到了能很好地证实理论结果的资料。更精密的证明是由利克天文台的台长W·W·坎贝尔和R·特朗普勒所提供的，[3]他们当时参加了W·H·克罗克的日食远征队到了西澳大利亚的沃拉尔（Wallal），观测了发生在1922年9月21日的日全食。坎贝尔发现了星像的1.72弧秒的角位移，而爱因

〔1〕 E·Grossmann, *Zeitschr.f.Phys.*, Vol. 5, 1921, p.280.

〔2〕 A·Einstein, *Relativity, The Special and General Theory*, New York, 1921. pp.150—152.

〔3〕 W·W·Campbell and R·Trumpler, *Lick Observatory Bulletins*, Vol.11, 1923—1924, p.41.

斯坦的预言值是1.74弧秒。

关于恒星表面上产生的光谱线跟地面上同一元素产生的光谱线相比时向红端移动的预言是对广义相对论的另一个检验。在太阳里，这个效应是如此之小，以致于很难测量它。在1919年以前，德国的观测者自称是发觉了氰带的红移，可是其他的观察者，特别是威尔逊山的C·E·圣·约翰得到了否定的结果。[1] 1923年，圣约翰在太阳光的331条铁光谱线中成功地测量到了红移。[2]他断定，这种明显的不一致的红移不单是由于相对性，而且也是由于多普勒效应和当光通过太阳大气层时出现了微分散射。他证明，要区分这三种效应是有可能的。1925年，威尔逊山的W·S·亚丹斯[3]从一个重恒星中观察到光谱朝向红端的移动。惊人的是，狭义相对论在原子论中的应用解释了光谱线的精细结构。

说也奇怪，这个非常抽象的相对论得到了广泛的普遍的注意。人们处处都被它推导出来的明显的佯谬所吸引或所排斥。幽默家们在这个理论中发现了他们艺术表演的材料。

相对论的哲学意义

V·F·伦曾说：[4]"一般地说，理论物理学最新进展的特征之一是，新的概念和原理并不要求放弃旧的理论。早期的理论在以后的理论中作为一种极限情形而出现。这可以用许多例子说明它，但我将把自己限定在相对论上。这里，牛顿的理论是狭义相

〔1〕 E·Freundlich, *Die Naturwissenschaften*, 1919, p.520.

〔2〕 C·E·St·John, *Proceed. Nat. Acad. of Science*, Washington, Vol.12, 1926, p.65.

〔3〕 *Science*, Vol.61, 1925. p.X.

〔4〕 V·F·Lenzen, *Univ. of California Publications in Philosophy*, Vol.4, 1923, p.158.

对论的极限情形，狭义相对论是广义相对论的极限情形。在我看来，黑格尔的原理是物理学思想发展的这种状况的最好的表述，黑格尔的原理是，较低阶段的真理包含在发展的较高阶段的真理之中。"用爱因斯坦的话说："没有一个人会肯定地认为牛顿的伟大创造会真正地被这种或其他任何一种理论所代替。他的清晰和广阔的观念作为我们已经建立的现代物理学观念的基础将永远保持它们的意义。"[1]

350

能量和质量的相当性、太阳辐射

爱因斯坦[2]关于能量象物质一样具有惯性的观点导出了一个新奇的结论。如果把形成水的适量的氧和氢称过，并使这两者的混合物发生爆炸，然后让它冷却，能量具有惯性的学说就要求水的重量小于形成它的气体，因为相当于热能的重量辐射掉了。按照这个理论，9×10^{20}尔格（即C^2尔格，C是光速）的能量相当于一克的质量。这种被辐射的热能用今天的测量仪器来测量它是太小了。

这个理论在近来的宇宙学的思辨中起着首要的作用。J·H·金斯说，[3]由于质量转换成能量，"太阳辐射源的长久以来的难题看来终于得到解释……。太阳的辐射源是太阳的质量；太阳通过把它的质量转换成能来保持它的辐射……。其辐射率约为一分钟二亿五千万吨，这表示太阳质量的实际的减少。"

十九世纪时，罗伯特·迈尔和威廉·汤姆孙（开尔芬勋爵）

〔1〕 A·Einstein in the *London Times*, 再版于 Slosson's *Easy Lessons in Einstein*, 1921.

〔2〕 A·Einstein, *Annal. d. Phys.*, Vol.20, 1906, pp, 627—633; P·R·Heyl, *Fundamental Concepts of Physics*, 1926, p.71.

〔3〕 J·H·Jeans, *Atomicity and Quanta*, Cambridge, 1926, p. 12.

对太阳能来源的难题试作了解答，他们认为这是由于陨星落进了太阳，因而它们的机械能转变成热。后来，赫尔姆霍茨和威廉·汤姆孙提出了太阳收缩理论，伴随着收缩有势能转变成热的变化。这个理论在物理学家和地质学家之间的争论中起了突出作用，前者认为太阳和地球年龄不会超过六千万年或一亿年，后者坚持认为这样短的时间不可能解释地质构造和地球上生命的进化。当这个争论由于镭的发现而突然结束的时候，物理学家变成愿意让地质学家假定太阳和地球有很长的年龄，他们想要多长就有多长。然而，更仔细的计算使最近一些物理学家相信，即使放射性现象也不能解释太阳能，因为镭的"半衰期"短了；如果镭的数量是每1730年减半，那么辐射就会由此而相应的变化。但是，这和观测相矛盾。[1]更有希望的是以上讲到的现在的原子核理论，这是由金斯和爱丁顿提倡的。质量变换成能。而且，金斯还假设在太阳中存在有原子量比铀还大的放射性物质。

新量子力学

即使在1915年和1916年推广了量子论，但是人们发现，它的早期的形式体系在某些方面不适当，还需要修正。例如，旧理论不能令人满意地解释塞曼效应的反常现象。狄拉克就经典力学的困难曾讲到：[2]"长期以来人们认为，摆脱这个困境的出路在于经典理论的一个基本假设是错误的，而如果这个假设被取消和以某个更一般的理论来代替它的话，那么整个原子论就会十分自然地随之出现。"

哥丁根的W·海森伯[3]在努力奠定量子力学系统理论的基础

〔1〕 D·H·Menzel, *Science*, Vol.65, 1927, p.433.

〔2〕 P·Dirac, *Proc.Roy.Soc.*, London, S. A, Vol.110, 1926, p.561.

〔3〕 W·Heisenberg, *Zeitschr.f.Phys.*, Vol.33, 192, p.879.

方面迈出了最初的几步。M·玻恩和P·约尔丹、W·泡利和P·
352 狄拉克对他的形式体系部分作了简化，部分作了推广。量子论的更新的形式体系是由苏黎世的E·薛定谔作出的。[1]他受到巴黎的L·德布罗意的著作的启发，[2]提出了可以变换成玻恩和海森伯体系的波动力学理论。正如E·B·威尔逊所评述的那样，[3]玻尔轨道被一种以特征振动类型表示的结构所代替，这种特征在某些点上类似于1903年J·J·汤姆孙提出的观念，[4]他用了许多年的时间提出和检验法拉第力线和光粒子理论。德布罗意和薛定谔的理论将在原子模型史的结尾部分更充分地加以讨论。

布 朗 运 动

英国的植物学家R·布朗[5]（1773—1858）在1827年在显微镜下观察到水中很小微粒的极为活泼的和偶然的运动。每个微粒都互不相关地升起、沉下，又升起，而永不静止。微粒愈小就愈活跃。这就是所谓的“布朗运动”。它们也在其他液体中发生。索尔本的J·佩兰甚至在肥皂泡上的“黑点”所支托的小水滴上观察到它们。他把这种运动描述为“永恒的和自发的”。[6]直到1876年W·拉姆塞提出布朗运动是由于微粒跟运动分子碰撞所致

---

〔1〕 E·Schrödinger, *Annal.d.Phys.*, Vol.79, 1926, pp.361, 489, 734; Vol.80, 1926, p.437; Vol.81, 1926, p.109.

〔2〕 L·da Broglie, *Ann.de physique*, Vol.3, 1925, pp.22—128.

〔3〕 E·B·Wilson, *Science*, Vol.65, 1927, pp.265—271.

〔4〕 J·J·Thomson, Silliman's Lectures, Yale Univ., 发表于 *Electricity and Matter*, 1904, p.62; *Phil. May.*, Vol.48, 1924, p.737; Vol, 50, 1925, p.1181. 原文注〔4〕和注〔5〕误倒。——译者注.

〔5〕 R·Brown, *Edinburgh New Phil.Journal*, Vol.5, 1828, p.358.

〔6〕 J·Perrin, *Atoms*, tzans.by D·L·Hammick, London, 1923, p.85.

的假说，这才作出了对它的满意和解释。此后，J·德尔索克斯（1828—1891）和I·J·J·卡尔邦纳尔（1829—1889）解释道："在液体中物体的表面很大的场合，引起压力的分子碰撞不能引起悬浮物体的位移，因为总的看来它们倾向于同时在各个方向上给物体以推力。但是，如果表面小于确保所有的无规则运动被相互抵消所必需的面积，那么，我们肯定可以期望不相等地和连续地从一点到另一点的压力。这些压力不会由于集合法则而达到均匀。它们的合力不再为零，它们的强度和方向将不断地改变。"里昂的L·G·古伊[1]（1888年）、H·F·W·西登托夫[2]（1900年）和爱因斯坦[3]（1905年）得到了类似的结论。这些解释以有趣的方式说明了机遇或概率怎样进入到现代物理学理论之中。如果，由于机遇，在某个时刻，分子全部或几乎全部从同一方向挤压一个大的表面，那么这个表面就可能被推动。佩兰说：[4]"如果我们不比细菌更大，我们就能在这样的时刻（当粒子升起时）以这种方式达到的高度上去固定尘埃粒子、而不会遇到举起它的麻烦，并且还能建造房子而不用付出升举材料的代价。但是，要升举的微粒愈大，则被分子的扰动升举到一个给定的高度的机遇就愈小。想象被一根绳子吊在空中的一块有一公斤重的砖，它必定有一种布朗运动，虽然这运动一定很微弱。事实上，……在我们即使有一次机会看到这块砖由于布朗运动而上升到第二层之前……，我们必须等待的时间将是如此之长，以致几个地质世纪的长时期和甚至有可能我们的宇宙本身的漫长时期与之相比都显得是微不足道的。"于是就有这样的法则，在热平衡的介质中没有任何机关能够把介质的热能（分子的运动）转换成功，这个法则仅仅作为统计规律而出现，但是对普通大小的物体而言，违背这个法则是

353

［1］ *Journal d.Phys.*, Vol.7, 1888, p.188.

［2］ *Forsch.d.Rontgest.*, Vol.1, 1898.

［3］ *Annal.d.Physik.*, Vol.17, 1905, p.549.

［4］ J·Perrin, *Atoms*, 1923, p.87.

354 如此极端不可想象的事，而如果有人实际上考虑可以违背它那将是愚蠢的。以上的假说解释了布朗运动，虽然很吸引人，但需要实验的验证，正如佩兰在1908年所做的那样，他制备了适当的乳状液并测量了在某一高度范围内的圆柱体中的颗粒分布。当佩兰在巴黎做液体中的布朗运动实验时，芝加哥大学的R·A·密立根[1]和H·弗莱彻在1911年作了在气体中的这种运动的实验。

兰利论气体动力学

十九世纪后期，一些科学界人士十分怀疑那种成功地建造一种金属和木头的飞行机械，而它们不用比空气更轻的气体的帮助就可以上升和飞翔的可能性。H·S·麦克西姆于1894年在英国的实验多少倾向于保持这种观点。这些怀疑被华盛顿的美国斯密逊研究院的院长S·P·兰利的研究驱散了。他从事关于承受面的实验有许多年，并在他的《空气动力学实验》（1891年）和《风的内功》（1893年）的著作中作了论述。他证明，如果一块对它的运动方向向上倾斜的薄板面对静止的空气高速运动，空气的反作用就产生了升力。定量的数据得到了。他发现，在某些确定的条件下，航空上所要求的动力在理论上将随着速度的增加而无限的减少，而在实际上这个动力将减少到某一极限。人们称这为"兰利定律"。虽然这个定律的应用在增加速度和减少动力的过程中进一步受到安全要求的限制，但这个定律已在实践中得到证实。1896年5月6日，兰利在距华盛顿市约三十哩的波托马
355 克（Potomac）河上的屋形船中使他的飞行器械（"空中赛跑者"）之一作了第一次飞行。在这次秘密试验中，A·G·贝尔

---

〔1〕 *Phys.Review*, Vol.33, 1911, p.81; N.S., Vol.1, 1913, p.218.

（1847—1922）是唯一的目击者。在贝尔当时的陈述中，[1]我们读到，“正如我被告知的那样，包括蒸汽发动机和所有附属物在内的这个飞行器械的全部重量约为25磅，如我所看到的，承受面从这一端到另一端的距离约为12或14呎……。这个飞行器械……从水上约20呎的台上起飞，首先正面迎风上升，在所有时间都以惊人的稳定度向前飞行，其后绕着约100码直径的大曲线旋转，并继续上升直到它的蒸汽动力耗尽为止，在约经过一分半钟以后，我估计其高度约在空中80到100呎之间，当时轮子停止了转动，而飞行器械失去了它的螺旋桨的帮助，使我吃惊的是，它没有掉下来，而是如此平稳轻盈地落下，以致它碰到水面时没有一点儿冲撞，并且事实上立即准备好另一次试验。”贝尔用一个小照像机拍了一张照片，并把这张照片作了放大。[2]兰利在1897年这样估计他的工作[3]：“由于这些工作，迄今我才有了真正的科学兴趣。假如在开始时就能预见到要付出多么艰巨的劳动，要付出多大的精力和多少心血，那我对从事这项工作就一定会犹豫迟疑了。在科学知识方面我在一个艰难的课题中已尽量做到了我能做的一切，并且可以希望其结果对其他人会有用处，在这方面，如果有报酬的话，那么现在就一定要去寻找。我已结束了这部分看来是特别属于我的工作——证明了机械飞行是实际可行的——而对于下一步，即关于这种观念的商业的和实用的发展，或许这个世界得指望别的人了。” 356

飞行器械的成功导致了载人机械的思想。兰利犹豫了，但是在麦克金莱总统的鼓励下，他继续工作下去，他在1898年接受了五万美元的经费。此时正值内燃机开始引人注意的时候；为了一

〔1〕 A·G·Bell, *Nature*, Vol.54, 1896, May 28, P. 80. 也见 S·P·Langley, *McClure's Magazine*, June, 1897; *Smithsonian Report for* 1897, pp.169—181.

〔2〕 *Smithsonian Report for* 1900, p.216, Plate VI.

〔3〕 S·P·Langley, *Smithsonian Report for* 1900, p.216.

个12马力、重量不超过100磅的内燃机签订了一个合同，但是这个发动机的制造者不能满足设计书的要求。机械工程师 C·M·曼利同意和兰利合作造一架内燃机。曼利热情和忘我地工作着。经过若干实验以后，制造了一个52.4马力、重量为187磅、速率为每分钟950转的内燃机。1903年曼利在驾驶座上开动着机器起飞，但是他在驾驶时遇到了困难，机器摔进波托马克河中。第二次实验没有成功，方向舵与起飞跑道相纠缠。兰利受到了国会议员和报纸猛烈的抨击，除了为商业化作准备以外，私人资本拒绝为进一步试验提供帮助。[1]兰利死于1906年。

1914年，在提供新的发动机的情况下，用兰利的飞行器械作了几次成功的飞行；兰利的飞机结构原理的可靠性因此在实验上得到了证明。

本世纪初，人们热情地从事飞行试验。在兰利死后不久，英国的F·W·兰彻斯特和哥丁根的L·普朗特尔又着手研究飞行的理论问题。巴黎的A·G·埃菲尔为航空实验建筑了第一个重要的风洞。在欧洲发展了可操纵的气球。在美国俄亥俄州戴顿城（Dayton）的奥维尔·赖特和他的弟弟威尔伯·赖特于1903年第一次成功地用比空气还重的机械飞行。这兄弟俩发明了自那时以来一直用于飞行机械的操纵系统。欧洲和美国的发明家们在飞机的设计上表现了极大的能动性。〔第一次〕世界大战之前，最成功的机型是L·布莱里奥、莫朗和纽波特的单翼机，沃伊辛兄弟、H·法曼、G·柯蒂斯和赖特兄弟的双翼机。

357

物 质 结 构

比原子更小的物体

当J·J·汤姆孙在剑桥卡文迪许物理实验室从事于X射线和稀

〔1〕 H·Leffmann, *Smithsonian Report*, 1918, pp.157—167.

薄气体放电的研究时，他就开始了在这个发展上最初的实验步骤。我们已讲过了这个天才实验家的早期研究。他于1856年在曼彻斯特附近出生，在剑桥欧文学院和三一学院学习以后，他获得了第二名甲等数学优等生，并在1880年获得了二等史密斯奖金。他在数学物理学方面具有很高修养的第一批成果是《论涡旋环的运动》和《论动力学在物理学和化学中的应用》。在1884—1918年期间他是剑桥卡文迪许实验物理学教授。他培养了许多卓越的物理学家。从1918年起他保留了名誉教授之职。在1896年，当他考虑到气体放电时，他特别注意到哥尔德斯坦(1876年)称为"阴极射线"的射线，这所谓的"阴极射线"也曾得到J·普吕克尔（1801—1868年）、克鲁克斯、赫兹、勒纳和其他人的重视。J·J·汤姆孙还研究了"阴极射线"在磁场和电场中的偏转，并于1897年得出结论：这些"射线"不是以太波，而是物质粒子。他反问自己："这些粒子是什么呢？它们是原子还是分子，还是处在更精细的平衡状态中的物质？"[1]他作了比值m/e的测定，其中m是每个微粒的质量，e是每个微粒所带的负电荷。他发现这个比值和气体的性质无关，并且它的值10^{-7}比起电解质中氢离子的值10^{-4}这个以前已知的最小量要小得多。"[2]他继续讲道："这么小的m/e之值可能是由于m小或e大，或是这两者组合的结果……。在我看来，以最简单和直捷的方式说明这些事实的解释要根据许多化学家欣然采纳的关于化学元素结构的观点，这个观点是：不同化学元素的原子是同类原子的不同聚合。普劳特以下列形式说明了这个假说，[3]即不同元素的原子都是氢原子；在这样精确的形式中，这个假说是站不住脚的，但如果我们以某

358

〔1〕 J·J·Thomson, *Phil. May.*, 5.S., Vol.44, Oct.1897, p.302.

〔2〕 同上，pp.310, 311.

〔3〕 普劳特（1785—1850）是一个英国医生，他在1815年发表了一篇匿名论文，在这篇论文中他提出了这样的假设，即所有其它元素的原子确实是氢原子的聚合。

些未知的原始物质X代替氢，那么，我们就不知道什么东西是跟这个假说相矛盾的了，N·洛克耶爵士最近从恒星光谱的研究中作出的一些推论支持这种假说……，这样，根据这个观点我们在阴极射线中有了一种新状态的物质，……在这种状态里所有的物质——即来自诸如氢、氧等不同来源的物质——是同一种物质；这种物质是构成所有化学元素的物质。”于是，在这里，我们从严格的实验证据中谨慎地作出了最初的结论：即存在比原子更小的粒子。在这之前，原子一般地被假定为不可再分的东西。希腊人所用的“原子”（atom）一词本身，意味着*a*（不能），*temnō*（分割）。汤姆孙的实验指出，原子是由许多部分组成的，这个实验标志着科学的一个新时代。因为发现了原子量是非整数，正统的化学家把普劳特假说埋葬了80年，现在普劳特假说被复活了，并在同位素发现以后有了充沛的生命力。

359 电子的命名

这时，J·J·汤姆孙称这些粒子为“微粒”。“电子”这一名称是由G·J·斯通尼（1826—1911）在1891年采用的，[1]当然不是作为这些粒子的名称，而是作为电的基本单位的名称，即，他在1874年(第一次发表于1881年)提议，把电解时一个氢离子所带的电荷作为跟光速和引力系数一样的自然单位，一个自然的绝对计量制能够以这些自然单位为基础来代替纯属任意的CGS（厘米·克·秒)制。[2]这些观念和法拉第的电解实验是一致的，法拉第的电解实验指出，电就象物质一样是具有原子性的，H·赫尔姆

---

〔1〕 G·J·Stoney, *Scientific Trans. of the Roy. Dublin Soc.*, II.S., Vol. 4, 1891, p.563.

〔2〕 G·J·Stoney, *Proceed. Dublin Roy. Soc.*, Vol. 3, 1881, p.51; *Phil. Mag.*. S.S., Vol.11, 1881.

霍茨在他1881年关于法拉第的讲演中也清楚地说明了这一点。[1]后来，"电子"这一词就被应用来表示汤姆孙的"微粒"。

J•J•汤姆孙和卢瑟福

E•卢瑟福在作为汤姆孙的学生时曾在剑桥卡文迪许实验室做实验。因此，引用卢瑟福关于这个难忘的时期的说明是有意义的。"电子作为一个易动的带电单位，其质量比最轻的原子还小得多，1897年证明电子独立存在具有非常重要的意义。人们很快就看出了，电子必定是所有物质原子的组成部分，并且光谱是来源于它们的振动。电子的发现以及用各种不同的方法使它从所有的物质原子中释放出来的证明是具有头等重要意义的。因为它加 360 强了这种观点；即电子可能是表明化学性质周期变化的原子结构的共同单位。电子对于解决所有问题中最基本的问题——原子的详细结构——第一次给出了某种成功的希望。在这门学科的早期发展中主要得归功于J•J•汤姆孙爵士的工作，这既是由于他的思想解放，也是由于他在发展估计原子中电子数和探索原子结构的方法方面的天才。他早期的观点是，原子肯定是一种被电力集合在一起的电结构，并大致地表明了周期律中展示的元素的物理和化学性质变化的可能解释。"[2]

后面将要讲到，卢瑟福自己在物质结构的研究中也显得极端活跃和成功。卢瑟福于1871年出生在新西兰的纳尔森(Nelson)，他在他的祖国上大学。1894年他入剑桥三一学院，后来在卡文迪许实验室从事研究。在1898—1907年期间，他在加拿大麦吉尔(McGill)大学任物理学教授，在1907—1919年期间，他是

[1] Helmholtz, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Vol.3, p.69.

[2] E•Rutherford, *Science*, Vol.58, 1923, p.211.

曼彻斯特大学的教授。1919年他是剑桥实验物理学教授并继任了J·J·汤姆孙的卡文迪许实验室主任的工作。

质量守恒原理的推翻

1901年W·考夫曼报告了一个最重要的实验结果，[1]即当电子速度接近于光速时其质量急剧增加。这就为汤姆孙在1881年[2]和O·亥维赛（1850—1925）在1889年[3]所研究的质量起源的电磁理论提供了实验根据。按照这个实验，质量确实是一种能变动的量；因而，作为普适定律的重大的质量守恒原理就被推翻了。早在1630年，法国医生让·雷在思辨的基础上提出了这个原理，[4]接近十八世纪末，A·L·拉瓦锡（1743—1794）把这个原理采纳为在实验室中从事仔细称量经历化学变化的物质的化学家们经验的体现。在那些条件下，人们不可能发觉与这个定律的偏离。只有物体的速度接近以光速时，物体才由于它们的运动，质量有可观的增加。

361

开尔芬的原子模型

开尔芬勋爵在1901年以前34年提出过“涡漩原子”，而在1901年，为要适应新的观察事实，他又提出了一种新的原子模型。他写了一篇题为《原子化了的爱皮努斯》的文章。[5]圣彼得

[1] W·Kaufmann, *Göttinger Nachrichten*, Nov. 8, 1901.

[2] J·J·Thomson, *Phil. Mag.*, Vol. 11, 1881, pp. 229, 1230.

[3] O·Heaviside, *Collected Papers*, Vol. 2. p. 514.

[4] Jean Rey, *The Increase in Weight of Tin and Lead on Calcination*, 1630, Alembic Club Reprints, No. 11, 1895.

[5] Lord Kelvin, *Phil. Mag.*, Vol. 3, 1902, p. 257; Vol. 8, 1904, p. 528; Vol. 10, 1905, p. 695.

堡的爱皮努斯是仰慕B·富兰克林的人，他采用了富兰克林的电的单流体说。开尔芬假定，这种流体是由微小的、质量相等的和形状类似的物体〔(电原子)(electrions)〕组成的，它比有质的物质的原子要小得多。1902年，他评述道，[1]"现在几乎普遍地接受了法拉第、麦克斯韦考虑过的和赫尔姆霍茨明确地提出来的电的原子(电原子)"，"它们比物质的原子要小得多，并且能自由地穿过它们占有的空间"，"在物质的原子内部的一个电的原子受到指向原子中心的电力作用"；"每种物质在它里面都有电……。如果电原子或者电的原子不断地离开物质原子，那么它们可能会以超过光速的速度前进，而且这个物体是放射性的。"总之，开尔芬认为物质原子是由带正电的均匀球体组成的。整个 362 物质原子里面负电是按分立电子的形式分布的。

放射性是原子的性质，每个原子的行为都象一个恒定的能量发射源。按照居里夫妇在1902年的叙述，在他们的研究工作中，这已成为他们的指导原则。[2]

J·J·汤姆孙的原子模型

开尔芬原子被J·J·汤姆孙发展了。他提出的观点是，[3]"如果镭原子的质量是由于在它里面存在着大量的、每一个都带有负电荷……以及和相等的正电荷相结合的粒子，结果是使原子成为电中性的，这样，……原子具有的内能会如此巨大"以致于镭能维持辐射30,000年。1904年他假定，[4]原子是一个带正电的球，电子在这球内到处运动着。他假定原子的性质取决于电子数，取决于电子在它们的同心壳轨道上的分布和这个体系的稳定性。

〔1〕 Lord Kelvin, *Nature*, Vol.67, 1902, pp.45, 103.

〔2〕 *Comptes Rendus*, Vol.134, 1902, p.85.

〔3〕 J·J·Thomson, *Nature*, Vol.67, 1903, pp.601, 602.

〔4〕 J·J·Thomson, *Phil.Mag.*, Vol.7, 1904, p.237.

卢瑟福的原子模型

当卢瑟福在曼彻斯特大学时他就发现，[1]开尔芬和J·J·汤姆孙的原子模型不适用于解释α粒子通过不同种类的物质（例如通过金箔)时的散射量。因此，卢瑟福修改了这个模型，把这个模型里外对调，因而，正电荷集中在约只有原子直径的0.0001的原子核的中心（“好象一个大教堂里的一只苍蝇”），这个原子核被电子围绕，电子的分布是使原子电中性的。还有必要假定的是，原子的大部分质量是在正电荷上。这个原子模型是微型的行星系，多少有点类似于勒纳在1903年构想的“力心”（dynamids)[2]。如果一个带正电的α粒子通过金原子中心的附近，那么它将画出一条双曲线轨道。当α粒子越靠近金原子核通过时，那么，它的偏斜就越大。这样，卢瑟福和E·G·马斯登实验测定的α粒子的散射阐明了原子结构。

363

原 子 序 数

在原子论中，“原子序数”起着重要的作用。原子中的电子数是原子序数，即门捷列夫周期表中元素的序数，例如，氢为1，氦为2，锂为3，铍为4，如此等等。1911年，C·G·巴克拉（当时在伦敦大学，从1913年起是爱丁堡大学的物理学教授）所做的关于轻元素的实验指出，[3]在轻元素的原子中可以用测定每个原子的散射力来计算电子数。曼彻斯特大学和牛津的物理学实验教师H·G·J·莫塞莱（1884—1915）从事这个课题的研究，[4]他后

〔1〕 Rutherford, *Phil. Mag.*, Vol. 21, 1911, p. 669.

〔2〕 A·Sommerfeld, *Atombau* etc., 4. Ed., 1924, p. 14.

〔3〕 C·C·Barkla, *Phil. Mag.*, Vol. 21, 1911, p. 648.

〔4〕 我们用了卢瑟福在 *Nature*, Vol. 96, 1915, p. 33，上的关于莫塞莱的概述。

来在〔第一次〕世界大战中战死于达达尼尔（Dardanelles）。他发展了X射线的光谱学。他在1914年证明，[1]当把一种化学元素放在对阴极时就得到X射线的光谱，从X射线的光谱中立刻能得到该元素的原子序数。他首先检验了原子量在钙和锌之间的几种元素的光谱，并发现由这些元素中的每一个发出的两条明线组成的类似光谱。他证明，光谱中某一给定线的频率很近似地随(N—b)的平方而改变，这里，b是一个常数，N是一个整数，这整数在从一种元素转变到下一种元素时变化一个单位。当按原子量的增加次序排列时，莫塞莱使整数N跟元素的原子序数相等同。对于绝大多数的固体元素得到了类似的结果。他断言，原子序数N表示了原子核中单位正电荷数。因为在考察一条给定谱线的频率时，在从一种元素过渡到下一种元素是以定量增加的，因此，他能预言，在铝和金之间有三种而且只有三种未找到的元素。他预言了它们的原子序数以及它们的光谱。他预言铀的原子序数是92，他断定，在铀之前（包括铀）不会有92种以上的元素。G·乌尔班从巴黎到英国，利用莫塞莱的新方法澄清了有关稀土元素的原子序数的很多争论问题。莫塞莱的关于一种元素的性质是由它的原子序数确定的证明，具有理论上和实践上的巨大的重要性。 364

同 位 素

早在1912年F·索迪、A·S·罗素和K·法扬在研究放射现象时对同位素的存在提出了很多的猜测。哈佛大学的T·W·理查兹（1868—1928）指出，不同来源的铅的原子量有很大的区别。[2]他发现，普通铅的原子量为207.19，铀铅的原子量为206.08，澳

〔1〕 Moseley, *Phil. Mag.*, Vol.26, 1913, p.1024; Vol.27, 1914, p.703.

〔2〕 T.W.Richards, *Smithsonian Report for* 1918, pp. 205—219; *Science*, N.S., Vol.49.1919, pp. 1—11.

大利亚的混合铅是206.34。理查兹问道：[1]“我们应当把这些物质称为不同元素呢还是相同元素？最好的回答是索迪教授提出来的，他发明了一个新名词[2]，并且称它们为相同元素的‘同位素’。”“同位素”这一词意味着在化学元素周期表中“占有同一位置”。人们发现，两个同位素不能用任何化学实验把它们彼此区分开。它们在原子量上不同。通常两个同位素还有相同的光谱，但是，芝加哥的W·D·哈金斯[3]和L·阿伦伯格发现，[3]在$\lambda = 4058$Å的铅光谱线中，射铅的波长稍大于普通铅的波长。在1919年以前仅仅知道属于放射型的重元素的同位素，但在1919年确切地弄清了在一些轻元素和非放射性元素中也有同位素。早在1913年，J·J·汤姆孙完成了气态氖的部分分离，他用扩散的方法使氖分为原子量稍有不同的两部分。在剑桥卡文迪许实验室工作的F·W·阿斯顿为了以电磁场分析阳射线，改善了汤姆孙曾使用过的方法[4]，并且发展了阳射线摄谱学[5]。用他的新摄谱仪，他能把不同质量的粒子分开和使相等质量的那些粒子相聚。阿斯顿最终证明，氖气是由质量分别为20和22的两种同位素组成的，[6]还“有质量为21的第三种同位素的微小的可能性。”因为用化学方法测定的氖的原子量为20.200，人们作出推断，这两种同位素是以定比混合的。化学测定的氯的原子量是35.46，不是一个整数，但阿斯顿发现，它有两种同位素，它们的原子量分别为35和37，它们的定比为3比1。氢、碳、氮和氧没有发现同位素*。

〔1〕 T.W.Richards, *Smiths.Rep.*, 1918, p.217.

〔2〕 F.Soddy, *Chemistry of the Radio-Elements*, Part II, London, 1914, p.5.

〔3〕 *Astrophys.Jour.*, Vol.47, 1918, p.96.

〔4〕 J.J.Thomson, *Rays of Positive Electricity*, P.7 ff.

〔5〕 F.W.Aston, *Phil.Mag.*, Vol.38, 1919, p.707.

〔6〕 F.W.Aston, *Phil.Mag.*, Vol.39, 1920, pp.449, 611.

* 现在，氢、碳、氮和氧都已发现有同位素。——译者注。

1920年12月，阿斯顿发现了九种化学元素的同位素[1]。受阿斯顿 366
考察的所有的元素都处在气体状态。芝加哥大学的A·J·登普斯特以稍微不同的方法考察了包括镁、锌和钙在内的若干金属[2]。他发现，镁有三种同位素，其原子量分别为24，25和26；而化学测定的镁的原子量为24.32。由于同位素的发现，原子量就多少失去了它从前在化学中的主导地位。有彼此原子量相差多到8个单位的两种铅的同位素，但它们的化学性质完全相同。另一方面，元素RaD和Po有相同的原子量210，但具有不同的化学性质。[3]按照现代的观点，原始成分的原子量都是整数。

玻 尔 原 子[4]

长期以来就很显然的是，关于原子的理论必须解释光谱学的现象。光谱线似乎是由于电子运动所产生的辐射。但是，复杂的热辐射的实验资料促成了量子论的兴起。问题在于建立原子的结构和动力学理论是要解释量子论所依据的实验事实。首先，原子模型应当解释原子怎样能够发射出均匀的锐光谱线。卢瑟福的模型不能做到这一点，因为如果一个电子以频率ν绕着它的原子核转动，它要发出辐射频率ν，那么电子因这个辐射而损失能量，并且必定以不断递减的频率而转动。正是在这一步N·玻尔抓住了这个问题。他于1913年第一次发表了关于这个课题的论文。[5]建立在卢瑟福模型的一般理论的基础之上并应用了量子论，他引 367

〔1〕 *Smithsonian Report* for 1920, p.239.

〔2〕 A.J.Dempster, *Phys.Rev.*, Vol.11, 1918, p.316; Vol.17, 1921, p.427.

〔3〕 A.Sommerfeld, *Atombau* etc., 4.Ed., 1924, p.162.

〔4〕 详见A.Sommerfeld, *Atombau und Spekrallinien*, 1924.

〔5〕 N.Bohr, *Phil.Mag.*, Vol.26, 1913, pp.1, 476, 857.

入了如下的三个假设：

Ⅰ、一个电子只能在某些特定的圆形轨道上绕着它的原子核转动，按照量子论，对于这些轨道电子的动量矩是$h/2\pi$的整数倍，其中h是普朗克常数。这样，尽管牛顿的经典动力学认为任何数目的任何大小的轨道都是可能的，但新理论只允许彼此间以一定等级差别的某些稳定的轨道。

Ⅱ、正常的电子在一个不变的轨道上绕着它的原子核转动，既不辐射也不吸收能量。这又和经典观念明显地相对立。

Ⅲ、仅当电子从一个较大能量的轨道落到另一个较靠近原子核的较小能量的轨道时才有辐射产生。而且，当电子从能量为E_2的轨道落到另一个能量为E_1的轨道时，以E_2-E_1表示的能量就是量$h\nu$表示的能量，并且构成均匀单色的辐射。公式$E_2-E_1=h\nu$被称为玻尔的"量子条件"。

这理论首先被应用到仅有一个电子绕着带正电的原子核转动的、并在力学上可能允许无限个轨道的氢原子中。在每一群氢原子中，由于允许电子从第3、第4、第5……或第n个许可的轨道（"能级"）跳进第2轨道，巴尔末系的各条谱线就发射出来了。此外，如果在每一群原子中，电子从第2、第3……或第n个许可的轨道中跳进第1个轨道，那就得到了赖曼的紫外线系，如果是从第4、第5……第n个轨道跳进第3个轨道中，那就产生了伯格曼的红外线系。这对于玻尔理论是一个伟大的胜利。在氢原子中，理论和观测的这种最不平常的数值上的一致性，迫使物理学家们不得不注意这个理论。而且，玻尔理论允许原子核移动，因为实际上原子核不是静止的。在氢原子中，原子核和电子绕着共同的重心运动。

368

在玻尔的早期研究中，他还致力于用几个圆型轨道建立较重元素（锂、铍、硼、碳）的原子模型，每一个轨道都被几个电子占居着，在最外层轨道上的电子数是等于该元素的原子价。由W·考塞尔、L·费伽、A·索末菲、R·拉登堡和其他人进行的这

些以及类似的研究必须被看作只是攻克一个最困难的领域的漫长战役中的初步的散兵战。

当然，具有一个电子和荷有双倍正电荷的原子核的简单的电离了的氦原子是容易服从玻尔理论的处理方式的。关于这种情况的方程，跟巴尔末系不同的仅是一个常数，它产生了某些氦的谱线系，而在这之前，这个氦谱线系被误认为是属于氢的。[1]R·A·密立根和加利福尼亚理工学院的I·S·鲍恩成功地相继剥除某些原子的一、二、三、四、五和六个外层电子，并且用实验方法研究了它们的效果。[2]

当然只带一个电子的氦原子很容易加以处理，但带二个电子的中性氦原子却产生了使玻尔、E·C·肯布尔、J·H·范·弗莱克和其他人曾经努力去攻克的困难。[3]

椭圆轨道

正如我们已经看到的，量子论在1915年被推广到几个自由度的系统。索末菲把这种推广应用到玻尔原子论中。在二个自由度的情况下，产生了两个量子条件，它们必须在确定电子的许可路径时被满足。玻尔采用了只能应用一个量子条件的圆形轨道。索 369 末菲引入了椭圆形轨道（在特殊情况下可以是圆形的），在这些轨道路径上的每个点都是由两个变量（到一个焦点的距离和角度）决定的，从而能够强加两个量子条件。这个理论又被进一步推广，以便把它应用到更高自由度的系统中。W·威尔逊、K·施瓦兹希耳德和P·S·爱普斯坦都参与了这方面的发展工作。

---

〔1〕 F·Reiche, *The Quantum Theory*, trans.by H·S·Hatfield and H·L·Brose, 2, Ed., London, 1924, p.90.

〔2〕 R·A·Millikan, *Science*, Vol.69, 1924, p.475.

〔3〕 *Phil.Mag.*, Vol.42, 1921, p.123; Vol.44, 1922, p.842.

把相对论运用到原子上

我们已经讲过行星轨道（特别是水星）的近日点的移动是由于相对论的结果。在椭圆形的电子轨道中应该发生相应的效应。1915年索末菲研究了这个课题，并且得到了非常漂亮的结果；它使光谱线的精细结构得到了解释。爱普斯坦在这种深入的数学形式化方面也是很积极的。由于近日点的移动，轨道失去了它的闭合的特征；加之，原子在它的椭圆轨道上的速度发生了变化，因而电子的质量也改变了。其结果是，电子从一个轨道跳到另一个轨道时已不再严格地产生相同的光谱线，而是产生了彼此非常靠近而又稍稍不同的光谱线。例如，[1]氢线H应有五条分谱线组成，它们排列成两条一组和三条一组。按照这个理论，这两组线之间的平均距离应当是0.126Å；而根据帕邢和迈斯纳的观测是0.124Å。密立根说：[2]“物理学史上难得有纯粹的理论公式在精确预言方面而有象索末菲的相对论-双线公式和爱普斯坦把同一370 种轨道考虑到在斯塔克效应中发现的谱线的数目和多重性的预言上那样惊人的成功。通过所谓的角量子数和内量子数的变化对光谱精细结构的全部解释是深入的理论分析和精巧的实验技术之间的相互作用而产生的空前伟大的成就之一。”

玻尔后来的研究

1918年，玻尔提出了称之为量子论和经典理论之间的他的“对应原理”，它比早先由A·鲁宾诺维兹提出的“选择原理”的影响深远得多。按照这个对应原理，对于高量子数，电子轨道

〔1〕 F·Reiche，同上页注〔1〕，p.96.

〔2〕 R·A·Millikan, *Proc. Am. Philos. Soc.*, Vol.65, 1926, p. 74.

的量子论过渡到经典力学的理论。用量子论计算和用经典理论计算的频率之间的差别用数学表示是差商和微分商（导数）之间的差别。对于表示高能级的高量子数，差商作为一个极限值趋近于微分商。在这种近似情况下，以前的经典光学的成就在新理论中就成为可利用的了。用经典理论成功地处理过的有关发射波强度以及偏振强度的问题，在新理论中对于大量子数的情形也变成可利用的了，用外推法已大胆地把它们应用到全部量子数中。"对应原理"的进一步发展是由玻尔，H·A·克喇末和J·C·斯莱特在1924年的联合研究中得到的。[1]

静 态 原 子

当物理学家和数学家们忙于玻尔原子的动力学时，某些化学家发明了另一种原子模型。与物理学家们的"动态"原子相对照，化学家们的模型是"静态"原子。当原子的真实结构的细节都已弄清时，物理学家和化学家当然一定会使他们的原子图像取得一致。但在目前，这两门科学界都不能声言自己已十分接近于现实的实在。一个科学界主要是从光谱学来处理问题；另一个科学界主要是从定位原子价看问题。静态原子的形式是由加利福尼亚大学的G·N·刘易斯在1916年描述的，[2]并由斯克内克塔迪城（Schenectady）的通用电气公司的I·朗缪尔作了进一步的发展。[3]这种静态原子的正电集中在非常小的重原子核上，电子分布在它周围的空间中。每个电子都占据着一个确定的"单元空

371

〔1〕 *Phil.Mag.*, 6.S., Vol.47, 1924, p.785.

〔2〕 G.N.Lewis, *Jour.Amer.Chem.Soc.*, Vol.38, 1916, p.726.

〔3〕 I.Langmuir, *Jour. Am. Chem. Soc.*, Vol.41, 1919, p.868. 关于静态原子的详细情形见*General Physics for Colleges* by D.L.Webster, H.W.Farwell, E.R.Drew, New York, 1923.

间”（cell），在这“单元空间”里就化学静力学的需要而言电子可以是静止的。在这些单元空间里，电子运动的可能性是作为化学家和物理学家之间的折衷方案而提出来的。静态原子很好地满足了化学静力学的要求。它暂时能很好地为化学家服务。但是大约从1923年起静态原子就不太受到人们的注意了。

e 的精密测量

正如斯通尼所推测的一样，早在1899年牛津的J·S·汤森德就已证明，[1]气体中的离子所带的正电荷或负电荷等于电解水中的氢离子所带的电荷。自从J·J·汤姆孙的开拓工作以来，就提出了各种各样的测量这个基本单位的方法，芝加哥大学的R·A·密立很(他在1921年以后在加利福尼亚理工学院工作)所提出的方法是最精确的。他做了一个油滴在两个水平板之间升降的实验，并且看到了由于它捕获一个或更多的离子而产生的速度变化。[2]他结372 论性地证明，电是由相等单位组成的，每个单个离子的电荷总是相同的，这个电荷单位不仅仅是统计的平均数，正如自从同位素发现以来原子量所已表明的一样。从他的测量中他已证明本杰明·富兰克林和最近的物理学家早先作出的推测，即电确实是具有原子性的结构。A·加尔斯特兰德说：“他(密立根)对单位电荷的精确求值是对物理学的不可估量的贡献，它能使我们以较高的精密度计算大量最重要的物理常数。”[3]

---

〔1〕 J.S.Townsend, *Phil.Trans.Roy.Soc.A*, Vol.193, 1899, p.129.

〔2〕 Millikan, *Phys.Rev.*, Vol.2, 1913, p.136; *Phil.Mag.*, Vol.34, 1917.P.1; R.A.Millikan, *The Electron*, Chicago, 1917, Chap.V.

〔3〕 *Science*, Vol.59, 1924, p.326.

电子和原子的碰撞

我们已经讲过α射线和原子碰撞的实验导致卢瑟福发现了原子的核，α射线和原子碰撞的实验也使C·T·R·威尔逊发现了原子释放的电子数及其分布。虽然这些快速粒子似乎是按照经典力学的定律碰撞的，但是J·夫兰克和G·赫兹在柏林进行实验时发现了在较慢运动的电子跟原子和分子的碰撞中，这些电子的行为完全否定了经典力学而证实了量子论。[1]在含有痕量水银蒸汽的真空管中，水银的原子受到电极所放出的电子的轰击。当把电极上的电压加到足以使电子以一定的极小速度以上的速度飞出时，分光镜上就出现了一条确实的水银光谱线。在较低的电压下，电子不能得到足够的能量以提供hν的需要，这条谱线也就不会显示出来。当电子的能量$\frac{1}{2}mv^2$小于hν时（其中ν是和原子内的电子有关的光谱线的频率），在所有这些场合，一个打在原子上的慢电子弹性地反跳回来，而原子的内能不发生任何变化。但是，当这个$\frac{1}{2}mv^2$超过hν时，施碰电子就可能把它的部分能量转给原子，施碰电子就失去了能量，而原子获得了能量，并且变为“受激”原子。 373

关于“受激”原子的问题，即通过碰撞使原子处于比正常状态更高能量的量子态的问题，一个重要的理论推论是由哥本哈根的两个年轻的物理学家O·克莱因和S·罗斯兰作出的。[2]他们断定，在热平衡的条件下，如果假定热力学第二定律仍然有效，那么一定有某些迄今尚未认识的机制，通过这种机制“受激”原

[1] J·Franck und G.Hertz, *Verhandl.d.Deutsch.Phys.Gesellsch.*, Vol.15, 1913, p.34; Vol.16, 1914, p.457; *Phys.Zeitschr.*, Vol.17, 1916, pp.409, 430; Vol.20, 1919, p.132.

[2] O.Klein und S.Rosseland, *Zeitschr.f.Physik*, Vol.4, 1921, p.46.

子能够回复到它的正常状态而完全不辐射能量。它可能把它的过剩的能量通过所谓的“第二种碰撞”传给电子，所以叫“第二种碰撞”是把它和产生“受激原子”的“第一种碰撞”相区别。这个结论得到了S·洛里亚[1]、G·卡利奥[2]、K·多纳特[3]等人所进行的有关光谱线的实验的支持。这个发现有希望澄清关于以太波和物质相互作用的含糊之处。实验直接地证明了电子在跟原子和离子碰撞时动能的增加，这个实验是由斯克内克塔迪城通用电气公司的I·朗缪尔实现的。[4]

晶体结构

晶体形式的巨大多样性早已进行了分类，但只是在最近才对研究晶体中的原子群设计了一些方法。这大部分是通过W·H·布喇格和他的儿子W·L·布喇格的实验而完成的。据发现，通过晶 374 体中原子的确定的排列，晶体的作用就象是一个光栅——它比用分度机做成的光栅要精致一万多倍。1912年，M·v·劳厄和他的同事发现，X射线被象光栅一样起作用的晶体真正地衍射。W·H·布喇格能够观察到X射线受晶体表面的反射，同时他表明，X射线的衍射提供了一种发现X射线光谱中明线波长的简单方法[5]。根据由晶体所投射的不同等级的光谱位置和强度的研究，就有可能考察晶体的结构，并推导出晶体中相继的原子面之间的距离。这些结果指出，晶体结构的单位是原子而不是分子。C·G·达尔

〔1〕 S.Loria, *Phys.Rev.*, Vol.26, 1925, p.573.

〔2〕 Günther Cario, *Zeitschr.f.Physik*, Vol.10, 1922, p.185.

〔3〕 K.Donat, 同上, Vol.29, 1924, p.345.

〔4〕 I.Langmuir, *Phys.Rev.*, Vol.26, 1925, p.585; J.Franck und P.Jordan, *Anregung von Quantensprüngen durch Stösse*, Berlin, 1926, p.215.

〔5〕 W·H·Bragg in *Science*, Vol.60, 1924, p.139.

文和A·H·康普顿也用X射线研究晶体结构。O·莱曼揭示了某些液体中意料不到的晶态排列的存在。在某些复杂的有机物质中，当温度稍高于它们的熔点时晶体排列显现得最为明显。当偏振光通过它们时就产生了一些花样和颜色。列宁格勒的A·T·约飞研究了晶体的物理形变。约飞关于绝缘体中一些电势的击穿以及电势对固体材料中的内聚力和化学力的关系的讨论具有巨大的实践上的重要性。他的一些研究成果指出了关于绝缘体和电容器的装置的一种新的和改进的方法。[1]

原子的动力学

人们期望着具有任意假定的玻尔的原子理论将被新的发展所取代。在这条路线上最早的努力是在1925年由哥丁根的W·海森伯和M·玻恩[2]以及P·约尔丹首创的原子动力学的新处理方法。它探讨光谱线的频率和强度，但不是从玻尔原子中的电子绕着原子核的轨道运动出发，而是直接从频率和强度本身开始。这种努力是要使原理更加明晰。英国剑桥的P·狄拉克做了类似的研究。新理论的最初的一些成就包括塞曼效应和康普顿效应（当X射线和γ射线被碰撞所散射时发生了波长和方向的变化）的解释。 375

波动力学

在"波动力学"这一名称下的一种抽象理论是由巴黎的L·德布罗意提出来的，[3]并且正在被E·薛定谔进行推广，薛定

〔1〕 A·T·Joffé in *Physikalische Zeitschrift*, Vol. 28, 1927, pp. 911—916.

〔2〕 M. Born, *Probleme der Atom dynamic*, 1926.

〔3〕 Louis de Broglie, *Thèses*, Paris, 1924; *Ondes et mouvements*, Paris, 1926. 见 P·R·Heyl in *Scientific Monthly*, January, 1928.

谔先前在苏黎世工作，后来到了柏林。这个理论和玻尔的原子论几乎涉及同样的范围，但要求它自己比玻尔原子论更好。德布罗意把相对论应用到量子论中，以mc^2单位也以$h\nu$来量度静止质量为m的单位粒子的能量，其中C是光速，h是普朗克常数，ν是周期变化的频率。这就是说，$mc^2=h\nu$。德布罗意在这里提出了一个问题，当粒子在运动时这个方程式将采取什么形式？按照相对论，运动增加质量，并使频率显著变慢；在运动时mc^2增加，$h\nu$减少。因此，上述方程在这里是不成立的。德布罗意在这里引入了一个新的假定，即物质粒子或电子是裹在随粒子运行的波群中，这个粒子就象一种物体防止一些个别的波比粒子本身运行得更快，使波在粒子的前面很近的地方消失，而这时新的波群在粒子后面产生。根据这个设想，德布罗意增加了ν和恢复了他的方程式的平衡。这个设想在物理学上并不新鲜。它和牛顿的"痉挛"

376 （fits）论有些类似。德布罗意把这些观念应用到在原子轨道中运行着的电子上，并成功地解释了玻尔的允许轨道的整数条件，但是他也遇到了某些新的困难。我们暂且先谈一下德布罗意的波动力学是跟贝尔电话实验室的C·戴维孙和L·H·革末做的一些重要的实验相一致的，[1]这些实验显示了电子在镍晶体上的选择反射。人们发现，对应于电子的某个确定的均匀速度，就有一些电子束以满足方程的一些十分明确的方向离开晶体。

德布罗意的波动力学成为薛定谔作出新的理论发展的起点，[2]他提出如下的问题，物质粒子在波群中有什么用？为什么不摔掉它而让波群来取代它的位置？这样，就提出了"波原子"理论。它是从力学中的"哈密顿原理"出发的一种数学理论。这个"波原子"不包括转动的电子。它做到了玻尔原子所能做到的一

〔1〕 *Phisical Review*, Vol. 29, 1927, p.908, 见 W·Duane in *Science*, Vol, 66, 1927, p.639.

〔2〕 E·Schrödinger, *Annal.d.Phys.*, Vol. 79, 1926, pp. 361, 489, 734; Vol.80, 1926, p.487; Vol.81, 1926, p.109.

切，而且还做得更多。它解释了玻尔原子未能解释的光谱线的相对强度。值得注意的是，很容易使薛定谔原子满足经典的要求。它指望调和光的微粒说（或量子说）和波动说。迄今这两者“就象鲨鱼和老虎一样，它们各自在自己的活动范围内称王称霸，而在对方的活动范围内却毫无能耐。”波动力学指望当一个两栖类动物，在陆地上和在水里都同样有能耐。然而，没有一个人以为这新理论是最终的理论。杜安说：“如果一些物理学理论以简单的方式解释了大量的事实，如果它们提供了用于描述现象的各种名词术语的定义和一种命名法则，那么，这些理论就是有用的。物理学理论是工具而不是信条。”

电　和　磁

377

电 磁 理 论

麦克斯韦的光的电磁理论（第245—247页）在上世纪期间由H·赫兹和O·亥维赛作了进一步的发展。有一个时期，人们对麦克斯韦方程作出了一个力学解释。[1]H·A·洛仑兹说[2]：“电磁学的基本方程能给以一种相当于某些力学的一般定理的形式，并且我们能作出力学‘模型’，在这个模型里的现象和电磁现象并行不悖。但人们在这过程中遇到的困难是模型变得如此复杂，除非假定它们仅对有限的一些事件有效，……因此不能令人满意。”

麦克斯韦的理论把它自身主要限制在电磁场的普遍定律上，它跟物质内部发生的事情无关。但是，电子论的出现使得改造电磁理论来适合电的原子性观念这件事成为值得想望的了。在这个

〔1〕 O·Lodge, *Modern Views of Electricity*, 1892.

〔2〕 *Kultur der Gegenwart. Physik*, 1915, p.323.

领域，莱顿的H·A·洛仑兹的工作是起主导作用的。[1]电子论假定，电磁过程是由于电子的定位和运动，把电磁过程看作是发生在以太中还不如看作是发生在物质中。金属的导电性是用“自由”电子的运动来解释的。当电力移动了非导体中的电子时，那个物体就成为极化的了。磁化被设想为是电子的一种或多或少的圆周运动。麦克斯韦基本方程式在这种新的表述中仍然成立。在电传导性的电子论中，人们对于金属中的自由电子的数目和它们的自由程的长度持有不同的观点。令人满意的金属电子论只是在新近由于索末菲应用了罗马的费米的新的统计理论才有可能被提出。[2]电子论还预言在高电流密度下会背离欧姆定律，被哈佛大学的P·W·布里奇曼首先用实验证明这对于金和银是正确的。[3]电阻的增加对于厚的金块比薄的金箔大，金比对同样厚度的银要大。

378

电子论有意义的应用是出现在斐兹杰惹—洛仑兹收缩中。老瑞利勋爵指出，一个普通的透明体当它收缩时在某个方向通过的光线应当发生双折射。但是，瑞利勋爵自己或者内布拉斯加(Nebraska)大学的D·W·B·布雷斯(1859—1905)都没有发现双折射的痕迹，[4]布雷斯以能够察觉预言的效应的1/50的灵敏的仪器重复了这个实验。按照洛仑兹的意见，这些实验不能证明没有收缩；根据他自己的理论，即电子的收缩和透明体的收缩正好具有相同的比例，因此它们的零效应正是人们所期望的。这样，这些

〔1〕 H·A·Lorantz, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Leiden, 1895. 也见 *Kultur der Gegenwart, Physik*, 1915, p. 324.

〔2〕 A.Sommerfeld, *Die Naturwissenschaften*, Vol.15, 1927, p.825.

〔3〕 *Phys.Rev.*, 2 .S., Vol.19, 1922, p.387.

〔4〕 D.B.Brace, *Phil.Mag.*, Vol. 7, 1904, p.317.

实验被解释为确实证实了洛仑兹的电子论。在爱因斯坦的相对论提出以后，H·韦耳（H·Weyl）推广了那个理论，结果是它不仅说明了万有引力现象，而且还说明了电磁现象并得到了跟麦克斯韦的电磁方程相同的方程式。这些方程证明它们自身在各种不同的条件下是能够作出解释的，因此具有几乎是魔术般奇妙的品质。我们还可以再引用歌德的《浮士德》（Faust）的话："写出这些符号的是一个神吗？"

磁　子

379

现代关于磁的观念是跟安培认为磁是由于电流而产生的观念相联系的。在解释物体的铁磁、顺磁和抗磁性时，基本的考虑是关于电子在圆形轨道还是在椭圆轨道中运动的问题。与某种原子模型形式有关的磁学理论自从1903年起就由J·J·汤姆孙、W·佛克脱、P·朗之万、P·魏斯和E·T·惠塔克尔发展起来了。在魏斯看来，我们应该有用于描述基元磁体的类似电子的"磁子"一词。有一些物理学家开始从事于磁力学实验。以只绕着钢棒的轴转动使大钢棒磁化是由俄亥俄州立大学的S·J·巴涅特和L·J·H巴涅特夫人首先用实验证明的，[1]他们于1914年12月把这发现送交美国物理学会。在这之前，只知道把物体放在磁场中使它磁化的方法。在转动时，"如果磁子有角动量，那么磁子将会有取向的变化，以便使它的转动方向跟强迫转动的方向更加接近一致。""起初，磁子均匀地指向各个方向的物体变为沿着强迫转动轴而

〔1〕 S·J·Barnett, *Phys.Rev.*, Vol. 6, 1915, p.239; *Bulletin National Research Council*, Washington. Vol. 3, 1922, 哥伦比亚大学的威尔斯，卡内基(Carnegie)学院的S·J·巴涅特，伊利诺斯(Illinois)大学的孔茨，哥伦比亚大学的昆比，威斯康星(Wisconsin)大学的特里和奥柏林(Oberlin)学院的威廉斯所作的关于磁的理论的报告。

磁化。”巴涅特在1915年期间对于转动速度和所产生磁的强度的比率作了更好的测定，他对镍、钴、软铁和郝斯勒合金(Heusler's alloy)都做了类似的测定。

巴涅特效应是O·W·里查森所预言的效应（即由磁化产生转动）的逆效应。[1] 1915和1916年A·爱因斯坦和W·J·德·哈斯进行过关于这个逆效应的实验。[2]后来，J·Q·斯蒂沃特[3]、W·塞克斯密和L·F·贝茨[4]对这逆效应做了更加彻底的研究，得到了类似于巴纳特在1914和1915年所得到的数据。并且是仅仅等于爱因斯坦和德哈斯所得到的数值的二分之一。这些实验的结果是理论要求的值的一半。在这里，有一个类似在塞曼效应中观察到的尚未得到令人满意的解释的反常效应。[5]

380

O·斯特恩和W·革拉赫的实验给出了磁子存在的直接证据，[6]他们使银挥发，并让银原子通过炉壁的隙缝逸出，使它横越过一个不均匀磁场，最后凝聚于一块玻璃板上。这些原子就淀积在两个狭带上，它们近似于对称地定位于没有磁场时没有位移的带的两旁。显然，有一半银原子被吸引向极部，另一半被排斥。这就发现了在气体状态下的正常银原子的磁矩是一个玻尔磁子的磁矩。在玻尔的原子论中，由于电子在它们的原子轨道上运动，磁子是磁矩的一定的量子单位。

我们继续介绍电磁理论的几个重要的实践上的发展。

---

〔1〕 O.W.Richardson, *Phys. Rev.*, Vol.26, 1908, p.248.

〔2〕 A.Einstein and W.J.de Hass, *Verhandl.d.deutsch.Phys. Gesellsch.*, Vol.17, 1915, p.152.

〔3〕 J.Q.Stewart, *Phys.Rev.*, Vol.11, 1918, p.100.

〔4〕 W.Sucksmith and L.F.Bates, *Proc.Roy.Soc.*, S.A, Vol.104, 1923, p.499.

〔5〕 S.J.Barnett and L.J.H.Barnett, *Proc.Am.Acad.Arts and Science*, Vol.60, 1925, p.128; A.Sommerfeld, *Atombau, etc.*, 4.Ed., 1924, p.635.

〔6〕 Stern and Gerlach, *Zeitschr.f.Phys.*, Vol.9, 1922, p.349.

浦品线圈

这个线圈是用于长途电话的基本发明，它得归功于哥伦比亚大学的M·浦品。这个发明是从数学分析得到的，并得到实验的验证。在浦品之前，某些人已认识到，正如象金属一样重的不可压缩的物体有比空气大得多的动力反应和弹性反应，因而传声要 381 更加好得多一样，所以，动力反应和弹性反应愈高，即电感愈高和移动电的电容愈低，通过导线发出电的振动将更容易。法国的A·瓦希和英国的O·亥维赛研究了电话传递的数学理论中电感的作用。绕着铁心的线圈使人想起了电感。瓦希等人尝试将线圈放在电话线中，但是没有成功。因为浦品得到了他自己所说的“广义拉格朗日问题的数学解”的指引，他取得了成功。这个数学解说：“把你的一些电感线圈放进你的电话线中，使它们相隔这样一些距离，使得对于要传递的全部电振动，每个波长内都将有几个线圈……，在架空线上每隔四哩或五哩放一个线圈，在电话电缆里约每隔一二哩放一个线圈。”[1]浦品告诉我们，在1894年的某一天他怎样考虑广义拉格朗日问题[2]，当时他攀登上瑞士的福卡（Furka）山路，在那里关于一根振动弦和导线中的电振荡之间的直接类比闪过了他的脑海。浦品在1899年3月提出了这一课题的数学理论，并在稍晚的时候申请专利。

无线电报技术和电话技术

在电报、电话、电灯和其它发明广泛地应用在现代生活中的情

---

〔1〕 Michael Pupin, *From Immigrant to Inventor*, New York, 1925, pp.335, 336.

〔2〕 同上，pp.331, 332, 336.

况下，有许多人竞相提出"热离子管"的发明权并引起了诉讼。[1]热离子管被用作以太中微弱的电振荡（即在H·赫兹的著名实验中已证明是实际存在的麦克斯韦电磁理论中的那些电磁波）的检波器或接收器。我们应当先讲一下，在热离子管发明之前几种其它的已经发明了的检波器。如下三种大概是这些检波器中最闻名的：(1)金屑检波器（第249页），是由E·布兰吕、O·洛奇和G·马可尼发展的，关于它的作用依赖于不完全的接触。马可尼的具有镍银屑的检波器，在无线电电报的发展时期中使用了约五年时光。(2)磁检波器，它最初应归于E·卢瑟福，E·威尔逊和G·马可尼。马可尼的磁检波器的根据的事实是，电振荡使铁的磁性变化（减少滞后）加速。这个装置使金屑检波器的使用衰退。(3)晶体检波器，是由美国军队的H·H·C·邓伍迪、波士顿的G·W·毕卡尔特和哈佛大学的G·W·皮尔士从对某些晶体和金属的接触的观测发展而成的。这些检波器出现在1906年。它们的作用就象是把振荡系列变为在相同方向运行着的电的输出的整流器，并能起到电话接收器的效用。这些晶体检波器被无线电报爱好者广泛使用。

"热离子管"是在以前使用的各种检波器上的重大改进。它的发明是由于J·J·汤姆孙等人在理论物理学上的多年研究才成为可能的。在这仪器的各种形状中，它能从灼热的阴极中发射出几种离子，J·J·汤姆孙的学生O·W·里查森称它们为"热离子"（thermions），而且这些热离子中大部分是电子。1904年，伦敦的J·A·夫累铭使真空灯泡内的白炽的金属或碳棒阴极发射出热离子，这个灯泡的阳极是一块冷金属板。这个装置称之为夫累铭

〔1〕 J.A.Fleming, *The Thermionic Valve*, London, 1919, 第Ⅰ、Ⅱ章和附录。在第5—7页和第46页上，夫累铭叙述了"爱迪生效应"，1883年，爱迪生在白炽灯泡中观察到热离子效应。不久以后，夫累铭对它作了考察。但是，在那时候，就接受和利用这个效应方面还没有充分地提出这些现象的理论。

电子管，它能够“整流”，整高频交流电，也就是把高频电振荡转换为单方向电流的输出，直流输出是能被电流计和电话检测出来的。J·爱耳斯特和H·盖泰尔在德国做成了多少类似的电子管。 383

夫累铭电子管的应用直到L·德·福雷斯特在美国引入了改进的管子以后几年才在实践上得到稳定的发展，德福雷斯特在1904年以前就开始实验，并首先发展了事实上是夫累铭在稍早时候已经发明了的管子。在1906年及以后，德福雷斯特得到了放大弱电流装置的专利。他在热电极和冷电极之间放入了一个栅形的第二个冷电极，从而引进了二极电子管。这栅极是一个穿孔板或是一根锯齿形（Z字形）的导线。这个新的器件称之为“三极管”。它不仅使他能够整流电振荡，而且还能够继电并在放大的尺度上重复电振荡。从此以后，这个器件和其他部件在无线电报技术和无线电装置方面得到高度的和有效的发展。

声　学

自从赫尔姆霍茨和年老的瑞利勋爵那个时代以来，声学理论没有得到根本性的新进展。记录产生声音的波动的照相法得到了发展。如果空气中的声波被电火花瞬时照明，电火花的闪光将会被象透镜一样作用的声波所折射，而声波会被记录在照相底片上。[1]1912年D·C·弥勒发表了显示声音曲线照相的仪器的说明书。这个仪器能配上一卷装在一个特殊的照相机中活动的胶片，也可以装配上旋转镜或屏来展示在讲话中显示的曲线。

研究礼堂声学的哈佛大学的W·C·赛宾[2]（1868—1919）已

〔1〕 D.C.Miller, *The Science of Musical Sounds*, New York, 1916, p.89.

〔2〕 W.C.Sabine, *American Architect*, Vol.68, 1900 (*Several Pages*); Vol.104, 1913, pp.252—279; *Proceed. Am. Acad. of Arts and Science*, Vol.42, 1906, pp.51—84.

384 应用了压缩声波照相。早在1900年赛宾就投身于测定礼堂的声学性质的科学方法的发展工作中。他详细地研究了大厅的设计和由于混响、共鸣等引起的大厅的缺陷。用厚的吸收毡贴在墙上和天花板上就可以减少混响。在奥地利的G・耶格尔[1]研究了建筑声学，他给出声音增大或衰减的公式具有在感应电路中电流增大或衰减的型式。他的衰减定律和赛宾在1900年得到的研究结果是一致的。在以后的研究中有伊利诺斯州（Illinois）大学的F・R・沃森[2]，德国的E・佩佐尔德和F・特伦德伦堡等人的工作。

回　顾

在十七世纪时，当思想界的领袖们打破了中世纪的祈求理性而不考虑观察事实的习惯，使他们自己顺从于残酷的事实的支配，而采取了表面上较少理智态度的时候，实验物理学就第一次大踏步前进了。我们看看在这个世纪里的“一种从中世纪思想的顽固理性中来的反冲”。[3]在十七世纪当中，主要的领导人有伽利略、开普勒、惠更斯和牛顿。在那个世纪里发生了科学上的大综合，建立了万有引力定律，它把人类从观测和理性的开端就知道的作用在地球表面物体上的重力推广应用到太阳系的一切物体上。385 这个综合需要有条理的思想，需要有最高级的智力。但这智力服从于一种处理方式，在中世纪时候对这种方式通常是不知道的，这种方式就是服从于难驾驭的事实的统治。

---

〔1〕 G.Jäger, *Sitzler. Akad.Wiss.*, Wien, Vol.120, 1911, 2a, pp.613—634.

〔2〕 F・R・Watson, *Bulletin* No.73, *Engineering Exp. Sta.*, Univ.of Illinois. 1914; *Science*, Vol.67, 1928, p.335.

〔3〕 A・N・Whitehead, *Science and the Modern Work*, New York, 1926, p.12.

更详细地把引力定律应用到天体力学中去是十八世纪期间做的事情，它构成了对定量关系的认真研究。但在其他科学部门中，在化学和物理学中，定量关系是常常被忽略的。十八世纪被称之为唯物主义的世纪。热、光、电、磁和氧化中起作用的动因都被大多数科学家看成是不同的物质形式，有一些物质形式是不可称量的。"热素"和"燃素"这些词可以作为那个时代的纪念品。"燃素"有时被假定为可称量的——有重量的东西。燃烧木头的灰烬的重量少于木头本身的重量，是由于燃素被排出去了。我们在这里已经有了粗略的定量的考虑。但是，当铁或铅被燃烧后，燃素从铁或铅中排斥出去而剩下的残渣要重于原来的金属。在这里定量关系又被忽视了，直到十八世纪末当拉瓦锡开始对天平表示应有的敬意时，才否定了跟那些仪器所提供的证据相对立的"燃素"。

在"热素"方面定量关系受到普遍的注意还要更慢些，否则，伦福德伯爵的大炮钻孔的热学实验就会作为反对热素这种物质形式的存在的结论性证据而迅速地被接受。

随着十九世纪而来的是许多方面的定律和秩序。这是一个相互关联的世纪。[1]在上一世纪各自独立的许多物质形式被归结为两类：物质和新的能量的概念。光的微粒说过去了，波动说比别的科学理论得到了也许更为完满的发展。十九世纪后半期，开尔芬勋爵说过在科学的天空中只有两朵乌云。然而，这两朵乌云注定要带来大旋风般的骚乱。 386

十九世纪的物理学家就象到达尼亚加拉瀑布城(Niagara Falls)的探险者，他们以精神上的满足注视着显现在他面前的自然现象的壮丽图景。二十世纪的物理学家就象进一步走到黄石公园(Yellowstone park)的探险者，并且他们为努力调和下

[1] Paul R. Heyl, *Fundamental Concepts of Physics in the Light of Modern Discovery*, Baltimore, 1926, Chap. II.

列事实而感到迷惘，在这个地方不仅有银瀑的飞泻，而且还有玉泉的趵突和晶簾的高挂，不是澄澈明静的水潭而是穿隙过缝的溪流。一个俄国的物理学家讲到[1]：在经过了三分之一或半个世纪以后，大大地增加了我们关于物理学事实的知识，我们的这些事实的和谐的协调关系在跟半个世纪前我们知道的协调关系比较起来是非常不完全的。他声称，在这个方面我们是倒退了。我们现在有许多费解的假说，即这些假说跟被认为是已很好确立的物理学定律相冲突。我们已经引入了涉及一些量的数学公式，它们在许多变化迷离的现象中起着广泛的作用，但是它们的物理意义却是不清楚的。在光的电磁理论中，我们有电场E和磁场H，以及振动现象。人们曾经认为，这些场和振动能用以太的性质来解释；但是现在，没有一个人能假设以太的没有矛盾的力学性质来解释所有已知的现象。事实上，某些科学家否定了以太的真正存在。普朗克引进了常数h，但是h是什么？我们诚然用hv解释了光电现象和其它现象，但是我们应该怎样解释光的干涉、偏振、折射和色散？为什么在原子内只有某些电子轨道才是可能的，才满足于显然是任意选定的方程，而按照牛顿力学，可能的轨道数是不受限制的？为什么原子中的电子当它在它的轨道中运动时387 不辐射出能量？这些假定虽然解释了观察到现象，但是必须承认物理学家正处在这样一种医生的地位上，他找到了某种有奇特疗效的神丹妙药，然而又不清楚这种药物是以什么方式治好疾病的。

人们在关于费解的假说的争论上费了许多力气。但是，旧物理学没有这种假说吗？地球吸引苹果的机制是什么？这是不知道的。我们变得习惯于那种神秘性而不再关心它了。但是，新的神秘性又冲击着我们。如果目前我们有更惊人的费解的假说，那么这个事实表明，在这个还是科学进展的原始时期里知识领域开拓

---

[1] O.D.Chwolson, *Die Evolution des Geistes der Physik.*, 1925, pp.184—197.

得越大，则接触到的未知也变得越多。我们愿意相信，在将来的某个时候，将达到和超过费解的假说的极大数，而且最终我们将被引导到和谐的一致，导致到古老的毕达哥拉斯派的“天体和谐”的理想。

物理实验室的进化

最早的研究实验室

在古代或中世纪没有从事物理学研究的实验室。在伽利略和科尔切斯特（Colchester）的吉尔伯特那时之前，实验的必要性通常是被忽略的。苦思瞑想经常被看成是科学发现的唯一必需的东西。直到吉尔伯特用天然磁石作成一个球，并用它证明我们地球的磁性就象他这个小球所显示的一样的时候，实验方法才在物理哲学家中获得了稳固的立足点；直到年轻的伽利略登上比萨斜塔抛下不同重量的铁球证明轻球和重球以同样的加速度落下的时候，人们才开始抛弃亚里士多德学派关于物理学研究的观念。那两个重物同时落地时的响声，“敲响了旧的哲学体系的丧钟，预告了新的哲学体系的诞生。” 388

看到在那些日子里许多以智慧著称的人把这些实验看作是对于精神和道德生活是危险的事确是令人发笑的。在写于1667年的《皇家学会史》中，[1]该书作者认为有必要认认真真保卫实验，论证“实验不会伤害教育”，“实验对于大学没有危险。”这些论证是非常必要的，因为牛津的教士们宣称，波义耳的研究正在

---

〔1〕 Tho. Sprat, *The History of the Royal Society of London*, 1667, pp.323,328；又参见 Robert Boyle, *The Usefulness of Experimental Philosophy*, Oxford, 1663, 1671. 在第三编“为了提倡实验哲学的研究”中，他论证，实验科学不会导致无神论。

摧毁宗教，而他的实验正在暗中破坏大学[1]。

实验家的出现标志着实验室的起源。我们指的不是现代型式的实验室。十九世纪以前所有实验室几乎没有例外，都是属于个别研究者所有或是它们的保护者所有的私人实验室。

化学研究实验室促进了物理实验室的诞生

人们建立化学和天文学的实验室机构要比物理实验室早得多。今天“Laboratorium”（实验室）一词在德文中意指化学实验室。[2]中世纪时期有炼金术和占星学的实验室。寻求长生不老药和金属嬗变的秘诀的愿望激励了人们的主动性。这些是跟人心的贪婪相一致的学科。在巴黎的罗浮（Louvre）宫的画廊上有一幅弗朗米斯（Flemish）艺术家特尼埃斯长老（Teniers，the elder）(?)的绘画。它描述了十六世纪时的一个化学实验室。[3]这艺术家描绘了一间有炼铁炉的大地下室。地板上摆满了蒸馏器、坩埚和甑。一群热心人围座在一张桌子周围。稍微考虑一下艺术家的想象力，在我们看来，这张绘画可能描绘了炼金术士欣赏的较为豪华的住所，他们博得了某些有权势的保护人的资助和保护。大多数的炼金术士是在远非豪华的避静处所进行实验的。即使在推理的方法完全成功之后，为着本国的或商业的目的的实验研究通常也是在室内进行。一直到十九世纪初，在那时候的最卓越的化学家柏齐里乌斯的实验室是他的厨房，在那里，化学和烹调一起进行。当由于吉尔伯特、伽利略和他们的继承者的影响使物理学开始成为实验科学时，物理学通常也是在同一个房子里

389

〔1〕 A.D.White，同129页注〔2〕Vol.1.，p.405.

〔2〕 见文章“Laboratorium”，在Brockhaus's or Meyer's *Konversations—Lexikon*.

〔3〕 这张画复制在Johnson's *Universal Cyclopoedia*，“Laboratories”一文中。

进行的，就象她的姐妹科学化学一样。比起今天来，从前的专门化远不如今天突出，一个学者精通几个科学分支是并不稀罕的事情。

早期的私人物理研究实验室

最早的物理实验是在私人实验室做的。研究者通常用把他的住家或房间的一部分变成科学研究的工场。当牛津的波义耳作他的气体弹性研究、证明了用他的名字命名的定律时，他使用了一根这么长的管子、以致他“不能在房间里方便地使用它”，因此他“只得在楼梯上使用它”。牛顿在他剑桥的寓所里完成了他的关于白光色散为各种色光的经典试验。本杰明·富兰克林在风筝实验以后，在他费城的家中竖起了一根绝缘铁杆，以便他自己不会在一旦空气大量带电的时候失去作试验的机会。 390

教学用实验室

在十九世纪以前，科学的实验室单是为创造性研究而存在；它们很少在初等或高等教育中起作用。毫无疑问，许多教师和科学家都感到这种实践上的过错，这些人中的首领是摩拉维亚（Moravian）的教育改革家J·A·科孟纽斯（1592—1671），他说：“人们应当不是从书本上，而是尽可能地从天空、从地上、从橡树和山毛榉中在智力上受到教育；这就是他们必须学习和研究事物的本身，而不仅仅是学习其他人关于这些事物的观测和证言。”他呼吁：“这样的人在哪里？他通过观察和实验教授物理学，而不是阅读亚里士多德派的或其它的教科书。”[1]

---

〔1〕 W·H·Welch, “The Evolution of Modern Scientific Laboratories”, *Electrician* (London), Vol.37, 1896, p.172.

接近十八世纪末，氧的发现者J·普利斯特列说了如下的话：“我因为有机会观察到这个国家的教育很少或几乎不以自然科学为对象而感到难过。……我注意到，如果我们愿意为哲学鉴别力和哲学研究打下很好的基础的话，人们就应当在年轻时习惯于观察、实验过程。特别是他们应当在年轻时开始研究理论和实践，由此可以把许多以往的发现真正地变成他们自己的东西；因为这样，这些发现将对他们更有价值得多。”[1]

在这段话中，普利斯特列提出了在今天正在得到实际上实现的思想，因为只有在相当近的年代里，才为高中学生建立了实验室，在这些实验室里年轻的学生们自己从事于实际的物理操作。

391

我们已经知道，实验研究在化学中比在物理学中流行得更早。在建立跟教育机构相联系的并计划由学生来使用的实验室方面，化学也取得领先地位。为什么物理学落后了呢？在这里有两个原因。首先，化学更加直接地为实际生活所需要。化学知识对于冶金是必不可缺的。另一方面，蒸汽时代尚未来到，电学和磁学作为科学还处在它们的摇篮时期。化学实验室优先的第二个原因是它们花费较少。土制的容器、瓶、试管、普通的化学试剂的原料，这些都不昂贵，而对装备一个化学实验室却又非常有用。另一方面，物理仪器是非常昂贵的。三百年前，空气泵、温度计和望远镜都是高价的奢侈品；它们在现在也是费钱的。一百六十年前，普利斯特列写道：“自然哲学更是一门特别需要财富资助的科学。”[2]

伟大的教育运动通常是从顶层开始的。实验室的教学方法首先在大学里采用，然后传给更初等的学校。开尔芬勋爵声称，[3]第

〔1〕 J.Priestley, *On Air*, Birmingham, 1790, Vol. I., p. XXIX

〔2〕 Joseph Priestley, *History of Electricity*, 4th ed., London, 1775, p. XV.

〔3〕 "Scientific Laboratories", *Nature*, Vol. 31, 1885, pp. 409—413.

一个为学生教学用的化学实验室是在1831年以前于格拉斯哥大学建立的，但至今还在的这种类型的第一个实验室看来是李比希建立的，他在1824年是吉森（Giessen）大学的临时化学教授。[1]确实，新的化学教育运动在德国比在苏格兰以更大的势头和更深远的影响开始发动。来自文明世界四面八方的学生们成群地聚集在吉森小城镇的小型大学里。[2]化学实验室很快在蒂宾根(Tübingen)、波恩、柏林等地建立了。 392

学生们定期地到化学实验室自己做实验的最早的美国学校是纽约特罗伊(Troy)的伦塞勒（Rensselaer）综合科技学院和波士顿的马萨诸塞理工学院。前者，可能从在1824年建立开始到1831年以前就要求学生们做实验工作[3]。这个运动是与吉森无关的。在马萨诸塞理工学院可能有更系统的课程安排。实验室方法在南北战争末期建立该校时起就已在这里流行了。[4]

从私人实验室到那些属于大学实验室的过渡是一种逐渐的过渡。通常是以这种方式生效的。有些教师允许他们的最热忱的和有前途的学生进入他们的私人实验室。这样，柏林的H·G·马格努斯（1802—1870）在他的寓所分出几间房作物理实验用。当李比希、马格努斯他们自己还是一个学生的时候就从柏齐里乌斯和盖-吕萨克那里得到了关于实验研究的启示。马格努斯在德国的影响是很大的。“他热爱青年，并且知道如何使他自己把他所献身的那门科学的趣味告诉青年而受到爱戴。[5]他于1834年作为临

〔1〕 T·C·Mendenhall, “The Evolution and Influence of Experimental Physics”, in the *Quarterly Calendar of the University of Chicago*, Vol.Ⅲ., August, 1894, p.10.

〔2〕 Ira Remsen, “On Chemieal Laboratories”, *Nature*, Vol. 49.1894, p.531.

〔3〕 *Science*, Vol.20, 1892, p.53; N.S., Vol. 8, 1898, p.205.

〔4〕 *Science*, Vol.19, 1892, p.351.

〔5〕 “Life and Labours of Henry Gustavus Magnus”, *Smithsonian Report*, 1870, pp.223—230.

时物理学教授在柏林大学开始他的工作，并在1845年被提升为常任教授。可以从他的学生那里得到一些有关他的私人实验室工作的观念。他的一个美国学生说："当我在这里工作时有三个别的 393 学生，一个进行声学研究，另一个在研究偏振光，第三个人是在检测新近发现的化合物晶体。"[1]在他指导下进行实验的最有成就的学生中有G·H·维德曼，赫尔姆霍茨和丁铎尔。随着学生数量的增加，私人实验室就变得愈来愈不适用了；大学开始给出财政资助，私人建立的实验室变成为正规的大学机构。在这过程中，马格努斯的实验室发展成为于1863年开办的柏林大学的物理实验室。类似的发展模式可以追溯到吉森的李比希的化学实验室和布雷斯劳（Breslau）的珀根杰（Purkinje）的生理学实验室。[2]

学生用物理实验室

学生用物理实验室在其它德国大学里也逐渐地建立起来了。这样，1846年P·G·约利（1810—1884）在海德尔堡（Heidelbery）开设了一个实验室。它由两间房子组成，这两间房起先是私人住宅。[3]在1850年这些仪器搬到稍微宽敞一点的寓所里，后来，基尔霍夫和本生在这里开始了他们的惊人的光谱分析研究。在谈到这些新的寓所时，昆克说："不管在现代人看来这个实验室可能是多么简陋的，但它是那时的德国学生能够从事实习工作的唯一物理实验室。"如果昆克的意思是不把私人实验室计算在内，那么这种说法可以说是正确的，然而在这之前很久，学生们是被吸引到柏林在马格努斯的私人实验室工作。赫尔姆霍茨在

[1] A·R·Leeds, "A Laboratory of Experimental Research," *Jour. Franklin Inst.* (3), Vol. 59, 1870, p. 210.

[2] *Science*, Vol. 3, 1884, p. 173.

[3] G. Quincke, *Geschichte d. physik. Instituts d. Univ.* Heidelberg, Heidelberg, 1885.

1847年就曾在这里工作过。

曾经主张建立最早的学生化学实验室的苏格兰格拉斯哥大学，也是应该享有第一个实行物理实验室教育的荣誉的候选者。 394 1845年开尔芬勋爵（威廉·汤姆孙）成为格拉斯哥大学的自然哲学教授。在他的创造性研究工作中，他邀请他的一些学生帮助他，其他的学生自动请求为他服务。[1]“这个物理实验室多年以来是旧的大学楼里的一间已废弃的酒窖。”[2]于是，老巴克斯(Bacchus)*就被现代科学女神取而代之了。在这一间房子里和后来增加的另一房间里进行了将近有25年之久的实验研究。最后于1870年格拉斯哥大学搬进了新的宏伟的大楼。在开尔芬指导下的学生的实验室工作大半是创造性研究。“他们的兴趣被激发起来了，他们因他们跟这个地方的指导人的经常交往来保持活跃的气氛，并且他们的热情是这样大，以致……人们早已知道实验军团(这是习惯的称呼)把自己分成两个班——一个班在白天工作，另一个班在晚上工作，一连工作几个星期，这样工作从不停顿。”[3]
格拉斯哥大学和柏林大学，都没有把一些物理实验课程正规地规定为构成整个课程的一个不可分的一些分科，进入实验室纯粹是自由选修的。我们认为，波士顿的马萨诸塞理工学院是第一个把实验物理课根据它的教育价值按照系统的计划而进行的；并且是为了获得一个学位所必需做的工作的一个部分。在这个问题上能

---

〔1〕 开尔芬说：“我所用的自愿实验人员当中的四分之三是修毕哲学课程后直接进入神学班的那些学生。我还记得一个德国大学教授当他听到这个规律和人员使用情况时所表现的惊讶：‘什么！神学家学物理学？’我回答说，‘是的，他们都这么做；而且他们中的许多人做了第一流的实验。’”——*Nature*, Vol.31, 1885, p.411.

〔2〕 *Nature*, Vol.55, 1897, p.487.

* 巴克斯(Bacchus)，是希腊神话中的酒神——译者注。

〔3〕 同〔2〕，P.487.也见开尔芬给皇家科学院委员会的证词，*Minutes of Evidence*, 1870, p.392.

与马萨诸塞理工学院争荣誉的大学是伦敦国王学院。大约是在同395 时，新英格兰和老英格兰采取了新的政策。W·G·亚丹斯说：“各个大学的物理学教授通常都选择他们的最好的学生到他们的私人实验室里帮助他们工作，这对教授和学生都是有利的，但我认为，克利夫顿教授是在三年多以前提出物理实验室中的训练过程应当构成每个物理学学生正规工作的一部分的第一个人。这个制度得到采纳，并且尽管没有任何基金，在国王学院内立刻大规模地付诸行动，到现在已经工作了快三个年头了。两个大房间联成的物理仪器陈列馆是为物理实验室作准备的，第三个房间是用作仓库和电池室。”[1]

R·B·克利夫顿（Robert Bellamy Clifton）的名字和英国实验物理教育确实几乎是同一个词。他是曼彻斯特欧文学院自然哲学讲座的第一个主持人。在他搬到牛津以后，他设计了英国的第一个实验室，“它是专门为实验物理学研究建造和设计的。它已作为一个典型。C·麦克斯韦当他设计（剑桥）卡文迪许实验室时访问过这个实验室，克利夫顿教授的设计的痕迹在我们几个大学的学院里都能够觉察出来。”[2]麦克斯韦于1871年在剑桥大学担任物理系主任，他的实验室是建立在1874年。[3]

剑桥和牛津两个实验室的实习是选修性的，而且从事于实验工作的学生数量是很少的。[4]但是，从这小部分人中却出现了英国后来的一些物理学家。

---

〔1〕 *Nature*, Vol. 3, 1871, p. 323.

〔2〕 A·W·Rücker, *Nature*, Vol. 50, 1894, p. 344.

〔3〕 见 *A History of the Cavendish Laboratory*, 1871—1910, London, 1910; R·T·Glazebrook, *James Clerk Maxwell and Modern Physics*, New York, 1896, p. 73.

〔4〕 Glazebrook, 同上, p. 76; *Minutes of Evidence taken before the Royal Commission on Scientific Instruction and the Advancement of Science*, 1870, pp. 387, 388, 28.

十九世纪初，法国是实验研究的大中心。然而，正如韦尔奇教授所说的："法国很不容易把相当的实验设备提供给她的科学人材。""实验家中的王子贝尔纳（Bernard）在潮湿的小地窖里工作着，他曾把那些可怜的巴黎式的代用实验室之一称之为'科学研究者的坟墓'"。盖-吕萨克的实验室是在底层，为防止他自己受潮，他穿着木底鞋。但是，尽管是这种条件，法国的科学家热忱地进行了研究和教学。李比希在他的自传中说[1]："盖-吕萨克、泰纳尔、杜隆等人在索尔本的讲演对我有难于形容的魅力。……法国人的讲演（通过语言的天才）所具有的科学问题的逻辑明晰性是别的语言难于达到的，因此，泰纳尔和盖-吕萨克成了实验论证的大师。讲演是由得体地安排好的前后相继的现象——那就是实验——所组成的。它们的联系是由口头讲解来完成的。实验的确使我感到高兴，因为它们以我所理解的语言对我讲话。" 396

盖-吕萨克邀请李比希到他的"私人实验室"工作。象其它地方一样，在巴黎没有供学生使用的公用实验室。创造性的工作者依靠他们自己的钱财来源。阿拉哥说：[2]"在十八世纪末和十九世纪初，没有一个人能成为真正的物理学家，除非他拥有许多昂贵的仪器，这些仪器磨得很光、很好地上了漆、并被摆放在玻璃箱内。"1806年，当盖-吕萨克是科学院的候选人时，他只拥有几件研究仪器，他在克服这些不利条件方面遇到了许多麻烦。我们知道，杜隆几乎把他的全部财产都花费在购置仪器上。菲涅耳私人进行了他的不朽的实验，他为仪器付出了他自己的大量资财。佛科的大多数实验是在他自己的住所进行的。有一次，学者们聚集到福赛·圣·维克多路（Rue Fossés Saint Victor）旁的安培的简陋住宅里参观一根铂金丝，这根铂金丝只要一通过电流， 397

〔1〕 *Smithsonian Report*, 1891, p.263.

〔2〕 Arago, "Eulogy of Gay-Lussac", *Smithsonian Report*, 1876, p.152.

就使自己穿过子午线。[1]

多年来，法国科学家们抱怨贫乏的实验设备和缺少房间，直到最后公共教育大臣迪律伊（Duruy）（于1864—1869年任职）才保证满足需要。在十九世纪初，德国从法国取得了教训；在这新时期过程倒转过来了。韦尔奇教授说："比起洛拉因(Lorain)1868年的报告和武尔茨（Wurtz）1870年的报告来，对德国实验室制度的价值和意义的认识是没有更公正的了，这些报告是在对德国实验室的建造和组织的个人研究的基础上作出来的。"

1868年7月31日的两份公告确认用实际的实习和操作补充科学讲演的必要性。这些公告还规定，除了学生实验室外，还要为教授和其他科学家建立用于创造性研究的专门的实验室。结果是大量的物理实验室和其他科学实验室建立起来了。[2]达尔伯克斯（Darboux）在1892年就这些变化写道："你知道在20年内在这些〔理科院校〕机构里发生了多么深刻的变化。处处都在重建和扩建大楼；它们被提供了实验科学用的巨大实验室。在某些地方这些实验室还是太小了——补救的办法是容易的……。在距离不远的地方有一间简陋的大房子就足够了。确实，巴黎的院校教授们决不会忘记以简陋的房子和格尔森（Gerson）大厅用于高等教育。"[3]

1868年老索尔本建起了物理实验室。J·雅曼任这个实验室主任一直到他于1886年去世时为止。在1894年它被移交给新的理学院，并且得到重建。由于这个实验室主任G·李普曼的研究，它也变得闻名于世。[4]

398

〔1〕 Heller, Ⅱ., p.609.

〔2〕 *Circular of Information*, Bureau of Education, Washington, D.C. No. 4, 1881, p.119.

〔3〕 *Report of the Commissioner of Education*, Washington, D.C., 1892—1893, Vol. 1, p.234.

〔4〕 A·Berget, in *La Nature*, Vol. 26, 1898, p. 225; *Nature*, Vol.58, p.12.

美国的物理实验室

在最近50年期间*美国实验室的发展是惊人的。正如已经讲过的一样，马萨诸塞理工学院首倡实验物理学。理工学院的第一任院长W·B·罗杰斯强烈倡导对大班级开设正规的实验课程的思想。1864年在起草新学院的目的和计划时，他讲到了这样一个实验室的某些首要目的。[1]

E·C·皮克林负责这一部门的工作。1869年4月朗克尔任这个学院的院长，他写了如下的话："皮克林非常详细地草拟了物理实验室的计划，这也是我很久以前想送你的计划……，皮克林很渴望着在十月份以前作好对三年级学生教授物理实验的准备工作；如果人们赞成一年的实验课（我感到必须要有一年的时间），那么我们就能够逐渐地扩大我们的仪器设备并在较低的年级开实验课。我相信，我们将及时地革新物理学的教学，正如在化学教学中已经实现了革新一样。"[2]

经过一年多一点时间的试验，皮克林作了如下的报告："要能使20个或30个学生做同一个实验而又没有重复的仪器、并要避免损坏精密仪器的危险，确有很大的困难。我们的计划是这样：在两间大房间（每间近100呎长）内安置一些桌子、准备好煤气和水……，在每一张桌子上放上做一个简单实验的仪器，这个仪器总是放在这个地方，因此就避免了搬动时打破它的危险。还要对每一个实验作详细的记录。"[3]其它几个大学，例如康奈尔大学很快就仿效照办。在刚才引用的一篇文章中皮克林说："在美

* 指1928年以前的50年。——译者注。

〔1〕 *Life and Letters of William Barton Rogers*, Boston and New York, 1896, Vol. Ⅱ., p.303.

〔2〕 同上， Vol. Ⅱ., p.287.

〔3〕 *Nature*, Vol. 3, 1871, p.241.

国现在（1871年）至少有四个已经使用或者准备使用的类似的实验室，而且有希望在几年之内这个数量将会大大地增加。”

虽然有皮克林的预言，但我们的学院和大学的绝大多数直到很晚的时候才提供学生用的物理实验室。在这一方面，工学院处于领先地位。不同于工学院的大学实验室教学是更新近的事情。1871年哈佛大学没有电学量度仪器，特罗布里奇教授不得不从库克(Cooke)教授私人搜集中借出仪器以便做一些关于他的新的余弦电流计的实验。[1]这个国家的大多数大物理实验室是在最近50年内才建筑和装备的。在1892年我们“跟欧洲任何大学实验室可以相比的实验室只有约半打。”[2]此外，或许有几个实验室象苏黎世的实验室一样，这个实验室从事物理学和电工学的实验，它的建造和装备耗费了3,000,000法郎。

为大班安排物理实验工作的困难，虽然皮克林尽力去克服，但还不能说已令人满意地解决了。我们的几所大的大学拿出了整座大楼来作为物理实验室之用，而且还以教科书和有插图的讲义讲授大学基础物理课程，却不给学生们自己做实验的机会。讲授能力和实验设备对一个或许是几百人的班级是不适当的。实验工作仅仅由少数几个选中的有较高物理学水平的学生来做，或是由

400 那些正在上技术课的学生来做。即使是法拉第，只有他不仅看到其他人作完这个实验，而且他自己也作完这个实验才能彻底理解这个科学实验，这句话里如果包含有真理的话，那么很清楚，上述方法和理想相距甚远。

还有两个指导大的物理实验班的特殊方法。一种是让所有的学生同时完成同样的实验（测量），每个学生都被供给所有必需

〔1〕 *Science*, N.S., Vol.Ⅷ, 1898, p.204. 有关比较几个美国、英国和德国的物理实验要求的情况，见 *Nature*, Vol. 58, 1898, pp.621.622.

〔2〕 A.G.Webster, “A National Physical Laboratory,” *The pedagogical Seminary*, Vol.Ⅱ., 1892, p.91.

的实验仪器；第二种方法是让每个学生完成不同的实验，因此，在同一个时候，有多少学生就做多少不同的实验。

第一种方法有很大的好处，它允许教师一劳永逸地同全班讨论实验理论，而不用单独地向每一个学生作重复的讲授。而且对一个大班，当全班学生进行同一个问题实验时，比每一个学生进行各自的实验而言是更容易管理些。这个实验程序的模式的最大缺点是即使有的话也只有少数大学有财力供给大班每个学生以同样的精密仪器。这门实验课无论在那里坚持下来仪器必定是廉价的，而实验工作常常缺少所希望的精密度。

第二种方法的优点是它不需要重复的或者多倍的仪器，因此要以高质量的仪器装备实验室是比较容易一些。每个学生在做不同的实验。一个班级的学生们在相继的几天里从一个实验转到另一个实验。学生们要比较他们的结果的机会比较少，每个学生更多地依靠他自己的智力。这是一种单独的方法，要求大量“手把手的教育”。一个教师用这种方法不能象第一种方法一样同时照顾到许多学生。再者，在这种方法里，每个学生的实验次序是不同的，一般说来，不可能让每个学生按照逻辑顺序进行实验。

407

就我们所知，只有很少的学院和大学彻底地做到所有的学生采用这两种方法中的一种。通常，在一些大班中，人们发现两种方法的结合跟现有的条件更为协调。

自从约1885年起，实验课程不仅在我们的高等院校而且还在我们的中学里发展和加强了。今天，许多中学比40年前的若干著名大学有更好的实验设备。

十九世纪末，中学的物理实验室教学在美国或许比在法国和德国发展得更为充分。巴黎理学院院长达尔布克斯（Darboux）在1892年报告如下：“在每个高级中学确实有一个物理馆，但是缺少让学生们动手操作的物理、化学和自然史方面的仪器。”[1]

---

[1] *Report of the Commissioner of Education*, Washington, 1892, 1893, Vol. Ⅰ. p. 233.

在德国，对让学生操作仪器和看到它的操作过程的合适性进行了充分的讨论，因此实验室是按照这种意见管理的。[1]

在美国，当1886年哈佛大学改变它在物理学方面的入学条件时，中学关于包括测量在内的个人的实验室工作的指导方针采取了确定的形式。“现在决定要确立由大学建议的实验室工作的入学条件，来代替教科书学习的入学条件，虽然教科书学习量相当大地增加了，而且仍然是那些不能使用实验设备的人的另一种代替 402 的入学条件。很快就明白，鉴于教师没有经验和他们可能采用很不同的标准和方法，因此需要一门经过仔细考虑的专门的实验课程……来使新计划取得成功。”1887年哈佛大学发行了一本小册子，以后又作了一些修订，书名是《初级物理实验图录》。

国家研究实验室

最近几年对于为实验而建立国家实验室已成为一种日益增长的需要，这种实验已超出与教育机构相联系的实验室的财源。在英国、德国和法国为整个地或部分地满足这些需要而建立的机构已有很长的时间了。英国有包括新的戴维-法拉第研究实验室的皇家研究院；德国在夏洛滕堡（Charlottenburg）有帝国物理技术研究院；法国的艺术和应用技术学院已有100年的时间了，在几年前在巴黎又建立了一个电气探测实验室。[2]

---

〔1〕参阅E·J·Goodwin, “Some Characteristics of Prussian Schools,” *Educational Review*, December, 1896；还有关于这篇文章的评论在 *Poske's Zeitschrift für den Physikalischen und Chmischen Unterricht*, X. Jahrgang, 1897, pp. 161, 162.

〔2〕A·G·Webster, *Pedagogical Seminary*, Vol. Ⅱ., 1892, p. 101.

皇家研究院

对于伦敦皇家研究院著名实验室，有个英国作家在1870年写道："皇家研究院在现代科学的传播和发展方面所承担的任务可能要比大学更大，皇家研究院是我们这一世纪的三个最伟大的哲学家，杨、戴维与法拉第的教学和工作的场所。"[1]今天的大不列颠人说它好象是"科学的伟人祠"。皇家研究院的阶梯式讲堂、模型房屋和工场都是在1800年建立的。按照研究院的创建者伦福德伯爵的意思，研究院的目的是促进应用科学。它起初还包括具有熔铁炉和风箱的铁工场。各种各样的机械模型被集中在一起。1802年以后，当伦福德离开英国时，工业成份减少了，纯科学的创造性研究占了优势。当皇家研究院的物理实验室建立起来时，在英国没有其它的实验室能跟它匹敌。尽管如此，它是很朴实的。它的著名是由于戴维爵士、法拉第和丁铎尔的卓越研究。七十年来它依然如故。在这后期由于牛津、剑桥、曼彻斯特和格拉斯哥的新实验室的建立它才显得比较差些。[2]在开始考虑皇家研究院的实验室的重建时，丁铎尔首先反对这个计划。他几乎是祈求保存戴维和法拉第曾经做出他们的发现的地方。[3]但是改进是必要的，并在1871年左右做了改进。

403

由于L·蒙德博士的慷慨支持，皇家研究院的实验室新近扩大了，一个拥有大量捐款和装备有现代仪器的新实验室建筑在和皇家研究院直接毗连之处。这个新的科学工场称之为"戴维-法拉第研究实验室"，它于1896年12月22日开始建立，并且是在瑞利勋爵和J·杜瓦教授的领导之下。它是"世界上唯一的一个完

---

[1] C·K·Akin in *Minutes of Evidence……on Scientific Instruction*, 1870, p.20.

[2] *Nature*, Vol. 7, 1872—1873, p.264.

[3] 同上，p.264.

全致力于纯科学研究的公共实验室”，“向有关科学问题的各种学派和各种观点的男女工作者开放。”[1]

在上一世纪下半叶的许多年里，在英国丘天文台（Kew Observatory）相当注意把仪器标准化。气象仪器、指南针、照相透镜都被检验和检证过。关于地磁的重要研究也是在这里进行的。[2]在这项工作中政府提供了帮助，但帮助不大。它提供了地基并许可使用一个旧的大楼；所有其它的费用都是靠私人捐助来支付的。

404

帝国研究院

德国由于它在夏洛滕堡有堂皇的新的帝国物理技术研究院，通常称为帝国研究院而受到其他国家的羡慕，W·西门子在1884年捐赠了约 125,000 美金作为这个研究院的基金。德意志帝国国会表决在这笔款项之外增加必要的拨款。提供了一些新的大楼，并且在1888年赫尔姆霍茨当了该院院长。他的职位继承人以及他们就职时间如下：F·科尔劳施（1895—1905），E·瓦尔堡（1905—1922），W·能斯特（1922—1924），F·帕那（1924—　）。帝国研究院不仅有为纯理论研究装备的部门，而且还有其他的致力于工业应用问题的研究部门。

法国科学院

100年前法国已有艺术和应用技术学院。它是在1794年在圣·马丁·德·尚普斯（St·Martin des Champs）老修道院中建成的，它成为一个机械、模型、工具、规划和制图的博物

〔1〕 *Nature*, Vol.55, 1896, p.209.

〔2〕 *Nature*, Vol.55, 1897, p.368.

馆。经常给工人和技工作有关应用科学的自由讲演。在物理学方面是由购置属于查理的“物理陈列室”的东西而开始的，并在1829年确立了物理学讲座。

由18个国家参加的国际度量衡委员会是在1875年组成的。为要建立国际标准米制，一个优良的实验室建立在巴黎附近的圣·克卢德（St·Cloud）公园里的布雷蒂尔楼（Pauillon de Breteuil）。[1]

英帝国国家物理实验室

405

在十九世纪最后几年里，在英帝国开始一个重要的新的运动：建立了“国家物理实验室”，由R·T·格雷兹布鲁克当主任。[2]他从1899年到1919年担任了这个职务，以后由曼彻斯特的前工程学教授J·佩塔维尔继任。实验室的主要的科学管理是依靠伦敦皇家学会的会长和委员会。正如格莱兹布鲁克说的，它的目的是“要使科学的力量为国家服务。”在头两年，实验室工作是在丘天文台进行的，格莱兹布鲁克带着三个助手开始在那儿工作。1900年在离伦敦约12哩的特丁顿（Teddington）的布希宫（Bushy House）和庭园被选作永久的地址。这个实验室得到了很快的发展。在1918年，拥有工作人员共为532人的八个研究室。1911年为检测船舶的模型开设了一个国立的船模实验池。有一个大楼是供研究空气力学用的。

美国标准局

美国标准局是按美国国会1901年3月3日的法案创设的。它

〔1〕 A.G.Webster, 同402页 注〔1〕.P.94.

〔2〕 *Nature*, Vol.63, 1901, P.300; Vol.64, 1901, P. 290; Vol.104, 1919, P. 8; Vol.116, 1925, P.63.

接受了原来海岸和大地测量局的度量衡处的任务。这个处是在1830年建立的，由F·R·哈斯勒负责。从1832年起直到1901年美国海岸测量局局长也是度量衡工作的负责人。“标准局”开始安置在靠近华盛顿的美国国会大厦的临时住所。它的永久地址距这个城市中心有些距离，在凡内斯街（Van Ness street）和康涅狄格（Connecticut）大街的拐角处，在那里的一片大地基上，

406 它拥有十多幢大楼，并有一个很大的科学工作队伍。它作为一个国家的物理实验室在理论和应用的物理学和化学的广阔领域进行度量和研究。S·W·斯特拉顿是该局建立后最初二十二年的局长。他的继任者是G·K·伯吉斯。

译 后 记

卡约里的《物理学史》一书是物理学史中的一本重要著作，在我国物理学界、科学史界是早已为大家所熟悉的。本译本是根据1928年该书第5版译出的，1962年该书第6版与第5版完全相同。由于它是本世纪二十年代写成的，因此该书有关中国古代物理学史的内容叙述是相当肤浅的，甚至还有错误。译者认为有必要对有关内容作些补充。

一 卡约里及其《物理学史》

本书作者卡约里是美国数学家和科学史家。他1859年生于瑞士，1875年到美国，1930年卒于美国。1883年，他在美国威斯康星大学获得物理学士，1886年理科硕士，1894年图伦内(Tulane)大学哲学博士。他先后担任图伦内大学应用数学教授(1887—1888)，科罗拉多学院物理学教授（1889—1898），数学教授（1898—1918）、工程系主任（1903—1918）。从1918年起他一直担任伯克利加利福尼亚大学数学史教授。他是美国数学学会、科学发展协会、科学史学会会员，美国科学艺术研究院研究员，国际科学史学会会员。其中，1924—25年曾任美国科学史学会副会长，1929年任国际科学史学会副会长。他的著作包括：《美国数学教学和数学史》(1890年版)；《数学史》（1919年第2版）；《初等数学史》（1917年第2版）；《现代方程理论导言》（1904年版），《北美洲和南美洲早期数学教学》（1928年版）；《文化

教育中的数学》（1928年版）；《数学符号史》（2卷本，1928—29年版）；《物理学史》（即本译本）；1934年加利福尼亚大学出版社又出版了他生前校注的《牛顿的〈自然哲学数学原理〉第三册，命题XⅡ》。

卡约里的《物理学史》，初版于1899年。1906年、1909年和1919年又重印了三次。1928年，该书作者对它进行了修订和补充后发行了第5版。1962年、即在卡约里死后32年，又由纽约和伦敦两家出版公司出了第6版。该书从初版到第6版经过了65年。一本能在半个多世纪中被人们看成是好书、能经受如此长时间考验的《物理学史》，在科学史著作中是不多见的。

该书是一本物理学通史，它叙述了从古代到1925年物理学发展的主要历史事实。这本书之所以长期来受到物理学界和科学史界的重视和推崇，是由它的许多特点决定的。

第一、从历史事实的取材到判断，作者的态度是比较客观的。例如，亚里士多德的物理学成就及其在中世纪的影响，托勒密体系和哥白尼体系孰是孰非，伽利略是否作过斜塔实验，望远镜和显微镜的发明应归功于那个国家那个人，以及在近代物理学成就的许多叙述上，等等，作者都从历史事实出发作出了比较公正和客观的描写。为了作到客观性，作者在许多问题上作了必要的考证。如众说纷云的牛顿推迟二十年发表万有引力定律的原因，作者在叙述了各种说法之后摆出了自己的论据和观点。一个历史学家切忌主观片面。科学史家也应当力求揭示历史事件的本来面目。

第二、在本书对许多重大历史事件的描述过程中，还揭示了对待这些事件的不同观点、不同思想的争论。科学与宗教之斗争、科学的进步与保守之争、正确与错误之争、大人物与小人物之争，都用历史事实作了生动描绘。这些叙述为哲学史、思想史的研究者们提供了丰富的素材。

第三、本书最后，迄今还是独一无二地描写了实验室的发展

历史。在其它各章中，也提供了一些现在出版的物理学史著作中不再提及的历史事件或尚未引起人们重视的发展事实，如N射线、北极光的研究进展，等等。

第四、本书对每一重大事件的叙述都附有参考文献，便于读者深入研究和查索事实的真伪。

二 中国古代物理学史概述

在本书的写作年代，有关中国古代物理学史的研究还刚开始，作者在本书中较早地述及并肯定中国人的一些物理学成就，是难能可贵的。但也由于客观原因，致使本书难免有误。为了纠正该书这方面的不足，并为读者提供一个关于中国古代物理学史的较为正确的看法，我们在这里作一个概略的叙述，虽然这个叙述也只能是挂一漏万的。

中国是世界文明发达最早的国家之一，物理学在中国有悠久的历史。

中国古代物理学在春秋战国时期（公元前770—前221年）以《墨经》和《考工记》两书为标志，达到了它的形成阶段。从秦、汉开始，经过三国、晋、南北朝、到隋、唐、五代的1200年间（公元前221—公元960年），是我国古代物理学的发展时期。宋、元时期（公元960—1368年）是我国古代物理学发展的鼎盛时期。只是到明、清时期（公元1368—1911年），我国古代物理学才逐渐走向衰落，与西方近代物理学比较，处于相对落后阶段。

力　学

在距今约5—6千年的仰韶文化时期，人们制成了一种陶壶。它尖底、腰大、口小、两耳在壶腰偏下些。用它提水特别方便：

空壶在水面会倾倒；当水注入壶的一半时，壶能自动正立。西周时期有一种“欹器”，可能是这种尖底壶的发展，它“虚则欹、中则正、满则覆”（《荀子·宥坐》）。这种“欹器”，大概是由于它的特殊形状，加水后重心位置会发生变化。

伟大的哲学家墨翟（约公元前5世纪前期—4世纪初）和他的弟子组成的墨家是春秋战国时期物理学成就最大的学派。在其代表作《墨经》中记述了大量的物理学知识。

《墨经》中对力作了“刑（形）之所以奋”的定义。在杠杆平衡原理的探讨中，它指出“衡……，长重者下，短轻者上。”这不仅考虑了力和重物的因素，而且考虑了两端与支点距离的因素。它初步讨论了浮体的平衡原理；讨论了平动、转动和滚动；正确地指出：凡重物，上不提挈，下不拖拽、旁不牵引，则必定垂直下落（“凡重，上弗挈，下弗收，旁弗劫，则下直”）；还讨论了横梁承重等有关材料力学问题。《墨经》还对时间、空间作出了正确定义。它认为，空间是包括各个方向的一切地点（“宇，弥异所也”），时间是不同时候的通称（“久，弥异时也”），而物体的运动必定要经过一定的空间和时间〔“宇或（域）徙，说在长宇久”〕。

《考工记》是春秋末年齐国人的著作。在《考工记·轮人》中，论述到车轮大小对拉力（牛或马）的影响时写道：轮太矮，马就像老是在上坡一样吃劲。它在分析小车的辕必须稍有弯度时指出：如辕直，则当车上坡时，不把车辕压低，就可能把牛勒死；车上坡，相当于加倍重量；即使上了坡，到下坡时，若不拉住车后，也要拉住牛后的皮带绳。这是从实践经验中对斜面受力的一种极好的分析。

《考工记》最早记述了惯性现象，它说：“劝登马力，马力既竭，辀犹能一取焉。”它在分析箭的各部分重量比率和箭飞行状态时写道：箭头太轻，箭会往下俯行；箭尾太轻，箭往上飞翔；中间过轻，箭会打转；中间过重，箭会上扬；羽多飞行慢，

羽少达不到的。

汉代开始，人们已把各种简单机械（如杠杆、桔槔、辘轳）联合使用，发明了齿轮。在各种大型机械中，张衡（公元78—139年）造地动仪；张衡、马钧（三国时人）、祖冲之（429—500年）、宋代燕肃等人都曾造过指南车。它是以车轮、平轮、立轴等各种齿轮的复合运动为基础，在车子开始运动时使车上木人的手指向南方，以后不管车向那个方向运动，木人将一直指南。卡约里书中误把指南车当作以磁针为基础的陆地罗盘了。从汉代到宋代，不少人造过记里鼓车。它是利用原动齿轮带动大小不同的一套从动齿轮，使车轮走满一里路时，有一个从动齿轮刚好转一圈，并拨动车上木人打鼓一次。公元二世纪，毕岚发明了名为“噶乌”的虹吸管。汉代工人丁缓造“被中香炉”，“为机环转四周，而炉体常平”（《西京杂记》卷一）。这是世界上最早的常平支架。可能在汉代之前，人们已发明了一种天平式验湿器，在天平两端分别挂上等重的炭和羽毛，利用炭的吸水性和天平两端的重量变化，可测知大气湿度的变化。

苏颂（1020—1101年）和韩公廉在1092年制造了一架大型的水运仪象台，即天文钟，它其中的一套称为“天衡”的杠杆装置，相当于现代钟表装置中的擒纵器或卡子，因此它是现代钟表的先驱。

王充（公元27—97年）在其著《论衡·状留篇》中写道：“是故车行于陆，船行于沟，其满而重者行迟，空而轻者行疾”，“任重，其进取疾速，难矣。”这段话表明，在一定外力条件下，重量（质量）越大的物体开始运动或改变运动状态（速度）就越困难。这具有动力学的思想萌芽。

关于参考坐标和运动的相对性问题，古代人有许多探讨。著名的“刻舟取剑”的故事出自战国末期。南北朝时期成书的《关尹子》还讨论了关于舟和水是谁在运动的古老争论。晋代束晳（公元三世纪人）认为：“乘船以涉水，水去西船不徙矣。”特

别有意义的是，在西汉时期成书的一本不知作者姓名的著作《春秋纬·考灵曜》中，有关于伽利略相对性原理的最古老的叙述："地恒动不止，而人不知，譬如人在大舟中，闭牖而坐，舟行不觉也。"

由于虹吸管在生产中的应用，使得中国古代人探讨了在近代科学中才明确的大气压力和真空现象。《关尹子》写道："瓶存二窍，以水实之，倒泻；闭一则不下。盖（气）不升则（水）不降。井虽千仞，汲之水上，盖（气）不降则（水）不升。"唐代王冰在《素问》注中更为科学地写道："虚管溉满，捻上悬之，水固不泄，为无升气而不能降也；空瓶小口，顿溉不入，为气不出而不能入也。"曾公亮（998—1078年）具体而正确地记述了建造大型虹吸管引水上山的技术。宋代俞琰在《席上腐谈》中对前人有关描述补充道："予幼时有道人见教，剧烧纸片纳空瓶，急覆于银盆之中，水皆涌入瓶，而银盆铿然有声，盖火气使之然也。又依法放于壮夫腹上，挈之不坠。即如铜（管）水滴，捻其窍，则水不滴，放之则滴。"这些文字表明，中国古代人曾作过各种表明大气压力的实验，但他们都没有得出大气压力的结论。中国古代人如实地用气和水二者的存在与否，来解释管内或瓶内水的上升或降落，而终究没有走上"自然界厌恶真空"的错误思辨。

在各种本草药物书中，古代人对各种矿物晶体的几何形状有大量描述。公元前二世纪，韩婴著《韩诗外传》中，已有关于六角形雪花的最早的观察记载。宋代沈括对陨石作了观察，得出陨石即来自天体的铁的科学论断。

至少在宋代，人们已发明了二种在生产和生活中必备的仪器。一是液体比重计，用于测定盐水的浓度；一是表面张力演示仪，用于观察桐油的优劣。宋代的液体比重计是，利用莲子、鸡蛋或桃仁在不同浓度的盐水中呈现不同的浮沉状态，以此决定盐水的浓度。元代的液体比重计有了很大改进：先把莲子分浸于已

知的四等盐水（最咸；二分盐一分水；半盐半水；一分盐三分水）中，然后将这四种莲子浸于未知浓度的盐水中，根据未知浓度盐水中各种莲子的浮沉状态，即可定出盐水浓度。表面张力演示仪是用细竹篾作成的。把细竹篾一头作成圆圈，蘸上桐油，若上等桐油，竹圈上有一薄层油面；若劣等桐油，油面就不能附着在竹圈上。因为劣等桐油有杂质，破坏了薄膜的形成。现在给学生们演示液体表面张力的仪器，也就是一头弯成圆形的铁丝。

在力学史上具有特殊意义的是，我国历史上曾几次进行大规模的大地测量工作。唐代一行（名张遂，638—？）和南宫说等人在开元十二年（724年）分赴十一个地方测量北极高度和圭表日影长度。南宫说在河南滑县、开封、扶沟、上蔡测量了该四地的距离。根据测量计算，他们发现，南北地距251.27唐里（约129.22公里），北极高度相差一度。这数值虽不太精确，但却是世界上第一次子午线的实际测量。在清康熙和乾隆年间，清政府又组织了二次大规模的大地测量工作。在1708—1718年间进行的一次，在全国测量了630多个地方的经纬度，建立了以北京为中心的经纬网。在这次测量中，决定以工部营造尺为标准，定1800尺为一里，200里合地球经线一度。这种使长度单位与地球经线一度弧长相当的度量衡制，在世界上是一个创举。它比法国宪政会议决定以地球经圈的四千万分之一弧长为一米早80年。在实测经线一度之长的过程中，还发现每度经线因纬度高下而有差别，这为发现地球是椭球体提供了资料。

热　　学

在温度计发明以前，古代人的热学知识大部分是经验积累和热学技术。

原始社会时期人们已利用和控制了火。钻燧取火的发明，是人类在实践中第一次解决了运动能量转化的具体例证。至迟西周

初期，人们已开始收藏冰，并用它防腐、保存食物和尸体。

火候或火色，是古代人一种温度高低的判别方法。古代人在烧制陶土、熔铸金属中熟练地掌握了它。《考工记》写道："凡铸金之状，金与锡，黑浊之气竭，黄白次之。黄白之气竭，青白次之。青白之气竭，青气次之。然后可铸也。"可能古代人的铜、锡原矿中含有碳、钠等不少杂质，不同物质有不同汽化点，这些汽化物质的颜色（碳黑色、钠黄色）可以作为判别火候或温度高低的一个标准。同一种物质，在加热时，初成暗红色，温度渐高，次第成橙色、黄色，约当温度在1000°C时，成白色。

从汉代开始，人们利用热空气上升原理使灯笼飞上空中，并用作军事信号。或者幻想以炙火加热于鸡蛋壳中，使蛋壳在疾风中高飞。燃气灯或走马灯也是我国古代人的伟大发明。利用燃烧加热空气，造成气流，使轻小物体（如纸马）旋转。这是近代燃气轮机的始祖。

《华阳国志》记载，水利专家李冰（生卒不详）在公元前250年左右开凿都江堰时，曾利用热胀冷缩原理打碎拦路巨石。元代陶宗仪（生活于14世纪）曾做过热胀冷缩实验。他把带孔窍的物体加热后，使另一个物体进入孔洞，从而这两个物体如"辘轳旋转，无分毫缝罅。"他明确讲到这是前一个物体"煮之胖胀"的缘故（《南村辍耕录》卷23）。

晋代张华（232—300年）在《博物志》中写道："煎麻油，水汽尽，无烟，不复沸，则还冷，可内手搅之，得水则焰起飞散，卒不灭，此也试之有验。"张华的记载表明油与水的不同沸点，又指出了油的递次沸腾现象。在长期的煮水泡茶的生活实践中，人们更清楚地发现了水的递次沸腾现象：在水未沸腾时，无气泡出现，称为"盲眼"；水初开时，水泡象"蟹眼"，然后象"鱼眼"，最后汽泡象珍珠般跳跃起舞（见宋、苏轼《东坡志林》）。用上述不同温度的水泡茶会有很不相同的效果。水"未熟则沫浮，过熟则茶沉"（蔡襄《茶录》上篇）。

从晋代以来，人们陆续发现，石油、油涓纸、石灰、麦糠、马矢粪草等物质会发生自燃。在今天，这些物质的自燃现象也还值得工业生产部门注意。

在公元七世纪，唐代孙思邈著的《孙真人丹经》、和公元九世纪、十世纪的一些有关炼丹的书籍中、以及曾公亮（998—1078年）在其著《武经总要》中都曾记述了火药的配方：其基本成份即硫磺、硝石和木炭。现在可以肯定地说，这种极大地影响到世界文明进展的发明是起源于中国。随着炼丹家发明了火药，它就被用于烟火杂戏、爆破和为军事目的而特制的各种火器中。而且以火药喷射推进的火箭至少在十三世纪初期已经在中国发明，并被在战争中实际使用。现在已比卡约里写书的年代清楚得多而且也肯定得多的是，火药是在十三世纪初期传入阿拉伯国家的，然后由阿拉伯传到欧洲，从而对整个欧洲社会产生了巨大影响。

宋代陶谷（生活于十世纪）在《清异录》中第一次记载了火柴的制造方法。“夜中有急，苦于作灯之缓，有智者批杉条，染硫磺，置之待用，一与火遇得焰，穗然既神之，呼引光奴。今遂有货者，易名火寸。”原始火柴的发明可能比这记载还要早些。在以后它的另一些名称有“发烛”，“焠儿”。从钻燧取火、到钢镰碰撞生火，到药料火柴的发火，直到火柴的摩擦取火，这是热学技术上的大进步。

声　　学

古代声学的产生是与乐器的制造密切相关的。石制的磬、陶制的钟、芦管编排的箫箫、土制的埙，等等，在远古时代就有了。夏商时期，已有铜制的铃、钟、编钟，皮制的鼓。商代人已形成绝对音高的观念，出现了半音音程；在编磬、编钟中已构成一定的谐和音高关系，具备了发明十二律理论的前提条件。至西

周时期，见于《诗经》记载的乐器有29种。在周初，已出现了十二律和七声音阶。完成于战国（公元前475—前221年）时期的《管子·地员篇》，第一次记载了我国定律调音的“三分损益”法：以某一律音的弦长为标准，其它各律依标准弦长逐次乘2/3（三分损一）或4/3（三分益一）而得。由此，人们已对弦长和音高关系作了定量的理论总结。根据西周时期已有弦乐器琴、瑟看来，三分损益法的实际使用当比《管子》记载还要早。用三分损益法计算得到的一个音阶中，基音、4度、5度和高8度的音程比为1∶3/4∶2/3∶1/2。由此可见，中国古代的有关声学知识比毕达哥拉斯要早。值得指出的是，明代朱载堉（1536—约1614年）以公比$\sqrt[12]{2}$的等比级数分配音律，使一个音阶中任何二个相邻音律间的频率比都是$\sqrt[12]{2}$，或者音程为100音分。从而，他于1584年在世界上最早完成了十二平均律，为各种键盘乐器打下了声学理论基础。

各种物体的共振现象及其应用是中国人在声学上的大量发现之一。在公元前3—4世纪成书的《庄子·杂篇·徐无鬼》中，最早记载了弦线的共振现象。晋代张华、唐代曹绍夔（生卒不详）还掌握了消除共振的方法，即稍微锉去共振物体上的一点物质，就不再发生共振了。特别是宋代沈括以实验演示共振现象是古代声学上的杰出成就。沈括说：“欲知其应者，先调其弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。”（《补笔谈》卷一）以纸人或纸游码演示共振现象，在欧洲直到十七世纪才出现。

由于乐器的发展，人们在公元前四世纪左右已定性地知道弦线粗细、张力与音调高低的关系。唐代，调音律官郭道源（生卒不详）在碗内盛不同数量的水，使在同样一组碗碟式乐器中奏出优美的音乐。这种以加减水量控制发声体振动频率的方法是中国人在声学技术上的一大创造。

物理声学中的波动概念也是渊源长久的。东汉时期，哲学家

王充（22—97年）曾用水波比喻“气”振动传声的例证。后来，明代庄元臣、宋应星等人都有类似的论述。当然，声波是纵波，水波是横波，古代人对此是分不清的。

光　　学

我国铜制镜子可能从殷商时期开始出现。根据《周礼·春官》和《考工记》的记载，西周（前11世纪—前770年）时期已有阳燧（凹面金属镜），用于点火；有专门掌管阳燧的官，叫“司烜氏”。

战国时期，墨家最伟大的成就是在光学方面。《墨经》中以八条文字连续地记述了光学问题。它们依次是：影子生成的道理；光线与影的关系；光线直线行进实验；光反射特性；从物体与光源的相对地位关系确定影子的大小；平面镜的反射现象；凹面镜的反射现象；凸面镜的反射现象。《墨经》中以小孔成像的实验论述光是直线行进的，这是我国古代独特的光学成就。关于凹面镜，它认为有两种像，一种是缩小而倒立的像，物体在凹面的球心之外；一种是放大而正立的像，物体在凹面的球心之内。由于墨家学派未曾用屏幕作观察，而是用自己的眼睛，因此未能发现当物体在球心和焦点之间所成的像，可见墨家的记述也是忠实于自己的实验的。关于凸面镜，它认为只有一种正立的像，而像的大小取决于物体和球心距离的远近。至于人们能看见物体的原因，墨家认为“人以目见，而目以火见”的正确道理。

在汉代《淮南子》书中探讨了阳燧的焦点问题。宋代沈括对阳燧一类凹面镜的观测，使他发现，“离镜一二寸，光聚为一点，大如麻菽，著物则火生”（《梦溪笔谈》）。这即是焦距和焦点。他把焦点称为“碍”，从而他对凹面镜成像原理作了正确叙述。

除阳燧外，人们还发现了许多能反射并聚焦光线的物体。晋代张华还发现圆形冰块和透明珠可以取火。这是凸透镜取火。公

元十世纪，南唐谭峭在其《化书》中描述了四种透镜及其成像情形："一名圭，一名珠，一名砥，一名盂。圭视者大，珠视者小，砥视者正，盂视者倒。"圭是双凹、发散透镜；珠是双凸、会聚透镜；砥是平凹、发散透镜；盂是平凸、会聚透镜。

汉代人利用平面镜的组合制造了最古老的开管式潜望镜："取大镜高悬，盛水盆于其下，则见四邻矣。"（《意林》卷六引自《淮南万毕术》）

东汉张衡在《灵宪》中对月光及月食现象作了正确的解释，他说："月光生于日之所照，魄生于日之所蔽。当日则光盈，就日则光尽。当日之冲，光常不合者，蔽于地也，是谓闇虚。"宋代沈括还第一次用类比演示实验来验证月亮圆缺的科学道理，他说："如一弹丸，以粉涂其半，侧视之，则粉处如钩；对视之，则正圆。"（《梦溪笔谈》卷七）

南宋时期的赵友钦，在其著《革象新书》中描述了一个大型的有关小孔成像的光学实验。他通过这个实验不仅证明光的直线行进的性质，而且还正确的说明了光源（大小、强度）、光源与小孔（大小）的距离、像（大小、亮度）三者之间的关系。赵友钦注重实验，并以实验推出物理结论、这是中世纪最伟大的物理学成就之一。

在中国古籍中，还有许多关于雨虹和色散现象的记述。早在汉代，蔡邕在其《月令章句》中就写到了雨虹的形成条件。唐初孔颖达（574—648年）在《〈礼记〉注疏》中写道："若云薄漏日，日照雨滴则虹生。"八世纪中期，唐代张志和在《玄真子》一书中记述了人造虹的简单实验："背日喷水成虹霓之状。"此外，人们还发现了许多晶体的分光现象，晋代葛洪（283—363年）在《抱朴子》书中记述了五种云母，向日举之，可以看到各种颜色的光。石英"映日射之，有五色圆光，其质六棱，或大如枣栗，则光采微芒；间有小如樱珠，则五色粲然可喜。"（杜季阳《云林石谱》卷上）宋代程大昌（1123—1195年）对露滴分光现象作

了深刻的描写："凡雨初霁或露之未晞，其余点缀于草木树叶之末，欲坠不坠，则皆聚为圆点，光莹可喜。日光入之，五色俱足，闪烁不定，是乃日之光品，著色于水，而非雨露有此五色也。"（《演繁露》）明代方以智（1611—1671年）就色散现象总结道："凡宝石面凸，则光成一条，有数棱则必有一面成五色。"（《物理小识》卷八）这些现象，在欧洲是在牛顿时代才发现的。

在应用光学上值得注意的是，大约十世纪时，人们知道用磷光物质作画，画中的牛白天看去在栏外吃草，夜晚看时卧于栏中。僧人赞宁（918—999）解释说：南方人在海潮退后到沙滩拾蚌，用蚌胎中的水和色作画，这样的画白天看不见、晚上就看见了（宋僧文莹《湘山野录》，周辉《青坡杂志》）。可以为这张有趣的画和赞宁的解释作证的是，1768年，西方科学家约翰·坎顿（John Canton）确实讲过一种由蚌作成的磷光体，在这种磷光体中加进一些其它的物质就可以发出带色的磷光。

电影艺术始源于中国。早在战国时代，《韩非子·外储说》写道：有人在豆荚内膜上作精细的图画，然后放在阳光照射的墙板洞上，则屋内墙壁上龙蛇车马历历可见。汉武帝刘徹因思念已故李夫人，方士齐少翁用活动影片的方法为武帝重现李夫人容貌。宋代储泳（生卒不详）恰当地把幻灯影戏称为"移景之法"，他详细地记述了有关的表演方式："隐像于镜，设灯于旁，灯镜交辉，传影于纸，此术多近施之。"（《祛疑说》）到宋仁宗时(1023—1063年)，幻灯艺术相当普遍，"市人有能谈三国事者，或采其说加缘饰作影人，为魏蜀吴三分战争之像。"（《事物纪原集类》）这相当于现代的说书和幻灯两种形式的结合。

电 与 磁

春秋末期的《管子·地数篇》、战国时期的《鬼谷子》、战

国末期的《吕氏春秋》等书中，都曾记述到天然磁石及其吸铁现象。记述了世界上最古老的指南针"司南。"

卡约里误把指南车——一种定向机械装置——当作指南针或罗盘，其实，"司南"才是指南针的始祖。汉代王充在《论衡》中记述道："司南之杓，投之于地，其柢指南。"

人们不仅发现了"磁石引针"一类的磁的吸引现象，而且还发现了磁的排斥现象。公元前127年，方士栾大以磁石作棋子，使互相触击。《淮南万毕术》中记有"磁石拒綦"的排斥现象。人们对磁石在防盗、防刺、作战和医疗上的应用作了许多幻想。

宋代的静磁学达到了古代阶段的最高峰。沈括(1031—1095)和寇宗奭都曾讲到人工磁化方法的发明：用磁石摩擦铁针，针即可获得磁性。曾公亮（998—1078）曾利用这种磁化方法："以薄铁片剪裁长二寸阔五分、首尾锐如鱼形，置炭火中烧之，候通赤，以铁钤钤鱼首出火，以尾正对子位，蘸水盆中，没尾数分则止，以密器收藏。"（《武经总要》）在这种方法中，利用了现代称为磁畴排列，地磁场方向和地磁倾角等因素，使铁片获得最可佳的磁性。而沈括是最早发现地磁偏角的，他在《梦溪笔谈》卷二十四中写道："方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。"直到1695年，清初刘献庭在《广阳杂记》中最早记述了磁屏蔽的现象，他写道："磁石吸铁，隔碍潜通……唯铁可以隔之耳。"

在关于指南针的发展方面也是于宋代最盛。沈括指出了四种指南针的安放法：水浮法，把针放在水面上；指甲法，把针放在光滑的指甲上；碗唇法，把针放在光滑的碗唇上；丝悬法，以蚕丝缀针腰、悬吊指针的方法。寇宗奭具体指出了，水浮法是把针贯穿在数根灯草上而浮托于水面的。宋代陈元靓在《事林广记·神仙幻术》中记载了另两种指南针安放法：一种是把磁针放于鱼形木片内，于水中浮之；一种是把磁针放于龟形木片内，以竹钉作转动支轴。丝悬法和指南龟是旱罗盘的始祖，其余方法后

来就发展为水罗盘。我国指南针于十二世纪末十三世纪初由海路传入阿拉伯，然后由阿拉伯传到欧洲。

可以肯定的是，我国最早把指南针用于航海。公元1119年宋代朱彧在《萍洲可谈》中就有记载，他写道："舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦观指南针。"以后有许多关于指南针用于航海的记载。由于航海罗盘的普遍使用，因此，针路、即在航线上不同地点的针位连结线也在十三世纪元末的典线中有了记载。

在静电学方面，汉代初期，人们就发现了琥珀和玳瑁的静电吸引现象。三国时吴国的虞翻曾听说"虎魄不取腐芥，磁石不受曲针。"（《三国志·吴书》）这就是，腐烂的芥草由于其含水而造成的导电性，致使其不被带静电的琥珀吸引；一些比较柔软的易于弯曲的金属（如金、铜）不被磁石吸引。晋代张华曾发现用梳子梳理头发和解脱丝绸毛料衣服时的起电现象，他看到静电闪光，听到放电的噼啪声。陶宏景（452—536）发现，当用布和琥珀摩擦代替用手摩擦的方法时，琥珀的静电吸引力明显增大。唐代段成式发现了用手和活猫摩擦时的静电火花，宋代张邦基曾发现孔雀毛的静电感应现象，明代的都邛（生卒不详）曾记述了一种丝绸的摩擦起电实验："吴绫为裳，暗室中力持曳，以手摩之良久，火星直出。"（《三余赘笔》）这些静电现象在欧洲直到近代科学诞生的十七、十八世纪才被发现。

关于物质结构的猜测

大约是在西周初期，萌发了古老的物质结构假说。据《尚书·洪范》载，人们认为万物是由金、木、水、火、土"五行"物质构成的，而且说明了这五行物质的不同性质。春秋战国时期，《管子·水地篇》设想水是万物（无机界）和诸生（有机界）的统一本原。墨家提出了物质不能再分的"端"的思想。

“端”和原子的概念相似。虽然在我国古代，原子的观念比较薄弱，但是关于物质可分尽与否的争论是激烈的。名家惠施（约前370—310）提出，“至大无外，谓之大一；至小无内，谓之小一。”“小一”的概念就是指物质可分割到一定的限度而不能再分。但是，名家公孙龙（约前320—250）提出了“一尺之捶，日取其半，永世不竭”的著名论断，这就肯定了物质是无限可分的。

我国最重要的物质结构假说是元气说。它从公元前四世纪宋钘和尹文提出宇宙万物统一于“气”的假说后，在历代得到唯物主义哲学家的不断补充和发展。明末清初，元气说达到了发展的顶峰。这个学说认为，宇宙天体和世界万物都是由一种所谓气的物质构成的。“气”希微无形，人眼察觉不出，但它又充满宇宙太空。元气的聚集成为有形实体，有形实体的消散就还原为气。一旦聚集着的元气离散开，它们就归于太空，并处在不停止的运动状态之中。由于“气”这种物质微粒的运动，由于“气”又有处在矛盾冲突中的两种属性、即阴和阳，因而就构成了宇宙天体和物质运动的多样性。李约瑟认为，中国古代的元气说曾影响了笛卡儿的漩涡说。虽然近百年来人们一直以为元气是类似于以太的东西，但近年来有人提出，它更类似于现代科学中的场的概念。

在概略地叙述了中国古代物理学史以后，我们要附带指出的是，在对比阅读中国古代和本书的物理学发展事实时，人们会发现许多有关科学技术的中西交流的史料。由于篇幅所限，本文不拟对此多加笔墨。

本书写到1925年，对于今天的读者来说，自然希望能增加直到1975年的半个世纪来的物理学史。当1962年该书第6版原样发行时，一方面肯定了该书的许多优点，一方面也有些人曾提出建

议，希望有一个学者能对本物理学史作这半个世纪的补充。但是，直到今天我们仍然未曾看到这个补充。当然，这个工作也不是译者力所能及的。因为近半个世纪来，物理学的发展如此之快，如此之全面，以致个人的能力是很不相当的。幸好，自然科学史研究所近代史室协同各方专家正在编写“二十世纪科学简史”，对近半个世纪物理学史感兴趣的同志届时可参阅该书有关内容。

本书在翻译中，承蒙朱铮、徐菊芳等同志帮助阅读稿本、抄写和审核校样，范岱年同志对译稿作校，特此致谢。鉴于译者学识浅薄、水平有限，译本中缺点和错误在所难免，欢迎读者不吝赐教。

译　者

一九八一年三月于北京

事 项 索 引

（按汉语拼音排列，页码为原书码，见本书边码）

A

B

C

D

F

G

H

K

L

M

Q

R

S

X

Y

Z

人 名 索 引

（人名前记有·号者，其生卒年是译者加的。页码为原书页码，见本书边码）

A

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

P

Q

R

S

T

U

V

W

Y

Z